

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie mécanique

Étude d'une pompe à vis magnétique pour améliorer la durabilité des embrayages magnétorhéologiques

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie mécanique

Raphaël PILON

Jury : Jean-Sébastien PLANTE (directeur)
François CHARRON
Mathieu PICARD

RÉSUMÉ

Les embrayages magnétorhéologiques (MR) apparaissent dans des applications hautes puissances (~ 1 kW) qui nécessitent une méthode d'actionnement rapide (ex. : les suspensions actives, les robots industriels et le contrôle des surfaces de vols d'aéronefs). Ces applications entraînent une usure prématurée du fluide magnétorhéologique (mélange d'huile et de particules de fer) contenu dans les embrayages. La durabilité des embrayages MR doit donc être améliorée. Pour répondre à ce besoin, les compositions de fluides MR ont été optimisées, mais peu de concepts mécaniques d'embrayage ont été testés pour améliorer la durabilité.

Pour ce faire, une hypothèse est de mélanger le fluide MR afin 1) de maintenir sa composition homogène, 2) de réduire sa température et 3) d'utiliser tout le volume de fluide disponible. L'objectif de ce projet est d'étudier le potentiel d'un mécanisme de pompage qui favorise le mélange du fluide MR afin d'améliorer sa durabilité. Le concept de pompe proposé est similaire à une pompe à vis typique. Plutôt que d'avoir un filet métallique, la vis est générée par une structure 3D de fluide MR sous l'effet d'un champ magnétique concentré. Cette concentration de champ est produite par des rainures hélicoïdales usinées à même le tambour de l'embrayage. La caractérisation expérimentale d'une telle pompe prouve qu'un débit significatif de fluide MR peut être pompé (25 ml/min). Également, des tests de durabilité démontrent qu'un embrayage équipé du mécanisme de pompage permet d'augmenter de 45% la durabilité comparativement à un embrayage standard muni d'un tambour lisse.

Mots-clés : embrayage, fluide, magnétorhéologique, pompe, durabilité, rainure

REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche n'aurait pu être réalisé sans le support de plusieurs personnes.

Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur de recherche, Jean-Sébastien Plante, Professeur au département de génie mécanique de l'Université de Sherbrooke pour son encadrement continu, ses conseils et ses idées tout au long de ma maîtrise. Il a su me partager son inventivité et sa passion pour la recherche et la mécanique.

Je me dois également de mentionner les gens du groupe Créatek, qui m'ont en premier lieu supporté dans mon projet de recherche et avec qui nous avons vécu plusieurs moments mémorables lors des soupers de groupes. Je n'oublierai jamais les soirées et nuits passées dans l'atelier à fabriquer toutes sortes d'engins en bonne compagnie.

Merci à l'équipe de recherche et développement chez Bell Helicopter pour leur support au projet et pour leurs conseils lors des réunions bimensuelles.

Un merci spécial à ma copine qui m'a encouragé pendant mes deux années de maîtrise et qui a même pris le temps de relire ce mémoire.

En terminant, je tiens à remercier grandement mes parents pour leur compréhension et leur soutien continu pendant tout mon parcours scolaire. Je leur en suis grandement reconnaissant.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1.1 Mise en contexte et problématique	1
1.2 Définition du projet de recherche	1
1.3 Objectifs du projet de recherche	3
1.4 Contributions originales	3
1.5 Plan du mémoire	3
ÉTAT DE L'ART	5
2.1 Fluide et embrayage magnétorhéologiques	5
2.2 Durabilité	6
2.2.1 Durabilité du fluide MR	6
2.2.2 Conception des embrayages pour la durabilité	8
2.2.3 Concepts d'interfaces de cisaillement	10
2.2.4 Freins MR	11
2.2.5 Pompes et rainures	14
2.3 Durabilité actuelle des fluides MR pour des applications haute puissance	18
2.4 Résumé de l'état de l'art	19
ARTICLE	20
Avant-propos	20
3.1 Abstract	22
3.2 Introduction	22
3.2.1 Motivation	22
3.2.2 Background and literature	23
3.2.3 Approach	24
3.3 Magnetic screw pump design	26
3.3.1 Principle of operation	26
3.3.2 MR Clutch	27
3.3.3 Analysis	29
3.4 Experimental setup	31
3.4.1 Experimental setup (test bench) and sensors	31

3.4.2	Flow tests methodology	32
3.4.3	Durability test sequence	33
3.5	Test Results.....	35
3.5.1	Flow tests results.....	35
3.5.2	Effect of grooves on torque output.....	39
3.5.3	Durability test results	39
3.6	Discussions and Conclusions	42
3.6.1	Summary	42
3.6.2	Extra benefits/potential applications of grooves.....	43
3.6.3	Future work.....	43
CONCLUSION.....		45
LISTE DES RÉFÉRENCES		47

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Pompe à vis magnétique (gauche) comparée à une pompe à vis standard (droite)....	2
Figure 2.1 : Alignement des particules magnétiques sous l'effet du champ magnétique [7].....	5
Figure 2.2: Embrayage MR utilisé pour effectuer les tests de durabilité au laboratoire Créatek ...	6
Figure 2.3 : Réduction de la contrainte de cisaillement en fonction du contenu en oxygène [9] ..	7
Figure 2.4 : Particules de fer neuves (gauche) et oxydées (droite) [9]	7
Figure 2.5 : Concept d'embrayage refroidi à l'eau [13].....	8
Figure 2.6 : Variation du couple en fonction de la température [13]	9
Figure 2.7 : Effet de la contrainte de cisaillement, du taux de cisaillement et de la température sur l'énergie totale dissipée par le fluide MR [14].....	10
Figure 2.8 : Rainures ajoutées à un tambour d'embrayage MR	10
Figure 2.9 : Énergie (MJ/ml) dissipée dans l'embrayage avec un tambour lisse (haut) et muni de rainures (bas) [14]	11
Figure 2.10 : Profil de vitesse (a), écoulement de Couette (b) et écoulement de Taylor-Couette (c) dans un frein MR [15]	12
Figure 2.11 : Interface de cisaillement qui retire le fluide la surface en rotation. Le mode désactivé est présenté à gauche et le mode active à droite. [17].....	14
Figure 2.12 : Concept de pompe externe intégrée à un embrayage MR [18].....	15
Figure 2.13 : Embrayage MR muni de rainures hélicoïdales (39) [19]	16
Figure 2.14 : Illustration du phénomène de pompage des rainures de Winslow [19]	16
Figure 2.15 : Embrayage MR muni de rainures (62A) sur les surfaces de cisaillement	17
Figure 2.16 : Rainures (25) ajoutées aux tambours de l'embrayage breveté par l'Université de Sherbrooke [21].....	18
Figure 3.1 : Magnetic screw pump concept (left) compared to a typical screw pump (right).	25
Figure 3.2 : Grooved drum magnetic field distribution finite element analysis under FEMM.	26
Figure 3.3 : Picture (left) and partial cross section (right) of a grooved drum with two grooves and a pitch of 12.7 with its dimensions. The blue arrow represents the MR fluid path when the drum is installed in a MR clutch.	27
Figure 3.4 : MR fluid aging clutch cross section. The MR fluid recirculation path is represented by the red arrows. The white arrows represent the magnetic field path.	28
Figure 3.5 : MR fluid transport hypothesis. Yellow fluid is un-magnetized and transported by solidified MF fluid particles which act as the screw flights.	30
Figure 3.6 : Analytical model results for a drum with two grooves and a pitch of 12.7 mm.	31
Figure 3.7 : Flow rate measurement test setup.	33
Figure 3.8 : Durability test sequence.	34
Figure 3.9 : Pump diagram of the 2 grooves and 12.7 mm pitch drum.	35
Figure 3.10 : Pump diagrams of 3 drums with a pitch of 12.7 mm for different coil currents.	36

Figure 3.11 : Typical screw pump model and experimental results differences for a drum with two grooves and a pitch of 12.7.....	37
Figure 3.12 : Yield screw pump model and experimental results comparison for a drum with two grooves and a pitch of 12.7.....	38
Figure 3.13 : Torque response to current steps for different groove geometries without restrictor on the left (0.375”) and with a plugged restrictor on the right.	39
Figure 3.14 : Comparing characterization open loop torques and LDE for clutches equipped with a grooved drum or smooth drum.....	40
Figure 3.15 : Aging torque and current of the grooved drum and smooth drum durability tests.	41
Figure 3.16 : Apparent viscosity values of the grooved drum (blue) and smooth drum (red) durability tests.....	41
Figure 3.17 : Pressure increase during grooved and smooth drum durability tests.	42

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: Valeurs numériques utilisées pour déterminer n_{crit}	13
Tableau 3.2 : Aging clutch specifications	29

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte et problématique

Dans le secteur aéronautique, les actionneurs hydrauliques sont utilisés pour contrôler les gouvernes des avions à cause de leur grande fiabilité et densité de force (N/kg). Par contre, ces systèmes hydrauliques nécessitent des maintenances fréquentes et coûteuses qui impliquent de grandes quantités d'huile corrosive et toxique (litres). Pour améliorer son empreinte écologique et réduire les coûts associés à la maintenance, l'industrie aéronautique vise à développer des actionneurs électriques [1], [2]. Les actionneurs électriques conventionnels sont composés d'un moteur électrique et d'une transmission mécanique (ex. : engrenages, vis sans fin). Cette configuration élimine totalement l'utilisation d'huile hydraulique et permet donc de réduire les coûts de maintenance et l'impact environnemental des systèmes d'actionnement [2]. Toutefois, les transmissions mécaniques sont vulnérables au coincement à cause des pièces qui s'engrènent [3]. Cette caractéristique est hautement indésirable pour assurer la fiabilité des avions. Pour contrer ce problème de fiabilité, un moteur électrique peut être couplé à un embrayage magnétorhéologique (MR) qui contient une très faible quantité de fluide MR (≈ 50 ml). En plus de leur excellente réponse dynamique [4], ces embrayages sont fondamentalement fiables grâce à l'absence de contact métal-métal entre l'entrée et la sortie de couple. La faisabilité d'un tel système appliqué à l'aéronautique a déjà été prouvée de façon expérimentale précédemment [5], mais la durabilité du fluide MR doit être améliorée pour atteindre les standards de fiabilité de l'industrie aéronautique.

1.2 Définition du projet de recherche

Le projet présenté dans ce mémoire étudie expérimentalement le potentiel d'utiliser une pompe pour forcer le mélange du fluide MR à l'intérieur d'un embrayage afin d'en améliorer la durabilité. Le concept de pompe proposé est similaire à une pompe à vis standard (ex. : pour l'extrusion de plastique), mais plutôt que d'avoir un filet de vis solide, le filet est généré par une structure 3D de fluide MR sous l'effet d'une concentration de champ magnétique. Le concept est présenté à la Figure 1.1.

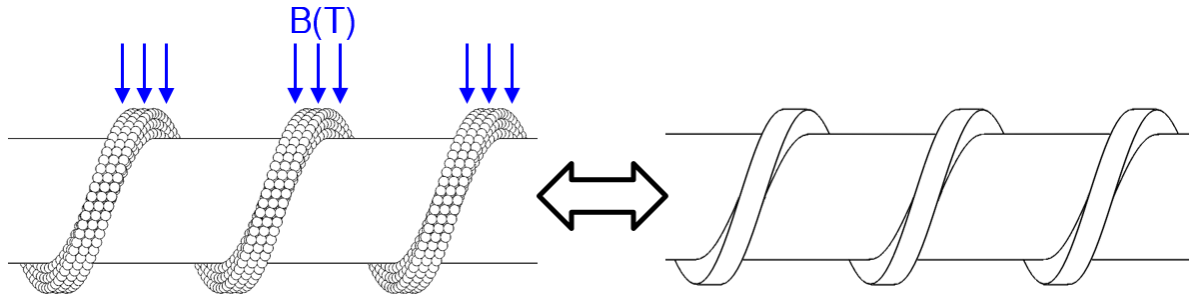


Figure 1.1 : Pompe à vis magnétique (gauche) comparée à une pompe à vis standard (droite)

Pour le secteur aéronautique ainsi que pour d'autres secteurs (industriels, automobiles, etc.), le développement et une compréhension approfondie de ce phénomène de pompage permettront :

- D'améliorer la durabilité des embrayages MR afin de les utiliser dans des applications commerciales.
- De faciliter la maintenance des embrayages MR en permettant l'utilisation de réservoirs externes de fluide MR et en facilitant la vidange et le remplissage des embrayages.
- D'augmenter la puissance transmise par les embrayages MR afin de les utiliser dans des applications hautes puissances (ex. : embrayages automobiles).

Les méthodes permettant d'améliorer la durabilité des fluides MR dans des applications à haute puissance (1 kW) sont peu explorées à ce jour. Les fluides MR sont utilisés depuis le début des années 2000 dans des applications à faibles puissances comme les amortisseurs d'automobiles. À cause des faibles puissances, la durabilité était un critère moins important. Les chercheurs se concentraient plutôt à améliorer la résistance à la sédimentation, le maintien d'une faible viscosité et la facilité de redispersion des particules [6]. Avec la venue d'applications haute puissance telle que la commande des surfaces de vol d'aéronefs il est nécessaire d'avoir des embrayages MR plus durables afin d'assurer la sécurité des aéronefs. C'est ce qui justifie ce projet de recherche.

1.3 Objectifs du projet de recherche

L'objectif général du projet de recherche est de démontrer que le concept de pompe à vis magnétique permet d'améliorer la durabilité des embrayages MR pour l'application de contrôle des surfaces de vol d'un hélicoptère. Plus spécifiquement, le projet de recherche a pour objectifs de:

- 1- Quantifier le débit de fluide MR généré par la pompe à vis en fonction du courant et de la vitesse de rotation;
- 2- Identifier le phénomène qui produit le pompage;
- 3- Évaluer l'impact de la pompe à vis magnétique et de la recirculation du fluide sur la durabilité d'un embrayage MR.

1.4 Contributions originales

Les travaux portant sur la durabilité des embrayages et des fluides MR pour des applications à haute puissance sont relativement limités. Le travail présenté dans ce mémoire expose donc plusieurs contributions scientifiques originales.

Tout d'abord, il existe très peu de concepts d'embrayages qui ont pour objectif d'augmenter la durabilité dans la littérature. La majorité des recherches ayant comme objectif d'améliorer la durabilité portent plutôt sur le développement de nouvelles formulations de fluide MR.

Ensuite, une telle pompe magnétique n'a jamais été testée dans la littérature. De plus, il n'a jamais été démontré que la pompe produisait un débit de fluide MR et le phénomène derrière son fonctionnement n'a jamais été décrit avec certitude.

D'autre part, l'impact de ce concept sur la durabilité d'un fluide MR n'a pas été documenté publiquement.

Enfin, le concept de pompe proposé permet de simplifier la maintenance d'un embrayage MR. En créant une circulation de fluide MR dans l'embrayage, il est possible de le relier à un réservoir externe de fluide MR, ce qui facilite grandement les changements de fluide.

1.5 Plan du mémoire

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres. D'abord, le chapitre 1 présente la mise en contexte du projet. Ensuite, le chapitre 2 décrit l'état de l'art antérieur sur le sujet. Ce chapitre est sous-divisé en sections qui décrivent ce qu'est un fluide MR et un embrayage MR, l'avancement de la durabilité des fluides MR, la conception d'embrayage MR pour la durabilité et différents

concepts de pompage de fluide MR existants. Le chapitre 3 présente un article scientifique qui résume les travaux réalisés dans le cadre de ce projet de recherche. L'article présente la caractérisation de la pompe magnétique ainsi qu'un modèle semi-empirique qui prédit le débit obtenu. De plus, le gain de durabilité causé par l'utilisation d'une pompe à vis magnétique est démontré en comparant deux tests de durabilité. Un test est équipé d'une pompe à vis alors que le second ne l'est pas. Une discussion sur les diverses incertitudes et applications possibles est également présentée. Finalement, la conclusion présentera un rappel des travaux réalisés, les applications possibles ainsi qu'un aperçu des travaux futurs.

CHAPITRE 2

ÉTAT DE L'ART

2.1 Fluide et embrayage magnétorhéologiques

Tout d'abord, un fluide MR est une suspension de micro particules magnétiques ($10\text{ }\mu\text{m}$) dans une base d'huile. Sous l'effet d'un champ magnétique, les particules magnétiques s'alignent comme illustrées à la Figure 2.1, ce qui a pour effet d'augmenter considérablement la viscosité apparente du fluide MR.

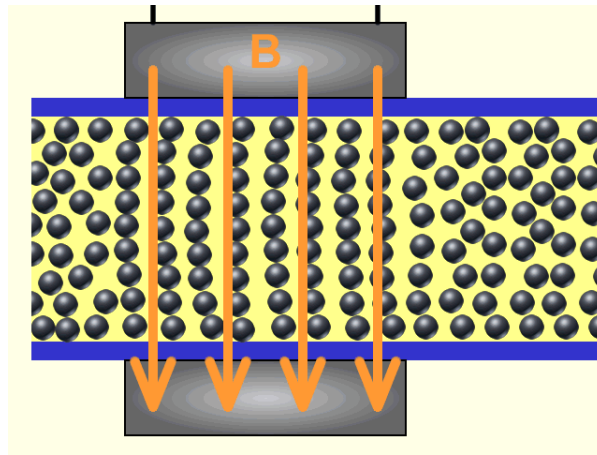


Figure 2.1 : Alignement des particules magnétiques sous l'effet du champ magnétique [7]

La Figure 2.2 présente l'embrayage développé par le laboratoire Créatek (Université de Sherbrooke) pour effectuer des tests de durabilité. On peut y voir les deux interfaces de cisaillement dans lesquelles se trouve le tambour qui tourne avec l'arbre (vert). Le reste de l'embrayage est fixe et il est retenu par une cellule de charge qui mesure le couple de l'embrayage. Tout l'embrayage est refroidi à l'eau.

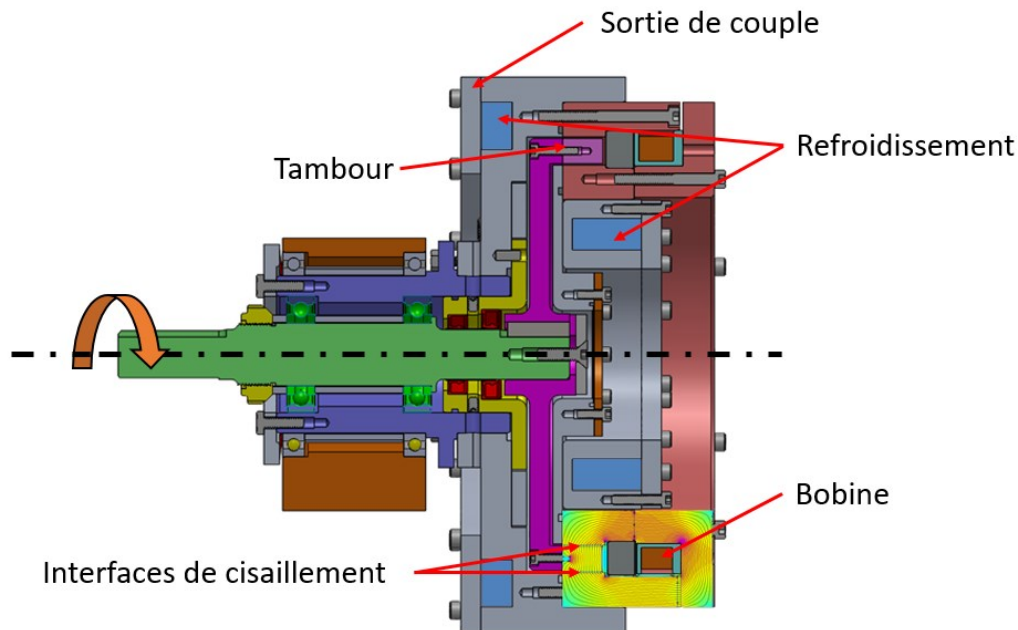


Figure 2.2: Embrayage MR utilisé pour effectuer les tests de durabilité au laboratoire Créatek

2.2 Durabilité

2.2.1 Durabilité du fluide MR

La durabilité des fluides MR a attiré l'attention des chercheurs au début des années 2000 [6], alors que les fluides MR commencèrent à être utilisés dans les amortisseurs d'automobile. Dans les ouvrages scientifiques portant sur les fluides MR, la durabilité des fluides est quantifiée par l'énergie dissipée dans une quantité de fluide au cours de sa vie (life dissipated energy ou LDE) [6]. L'énergie dissipée (en MJ) est divisée par le volume de fluide MR (en ml) et la durabilité est ainsi quantifiée en MJ/ml. Ces unités seront également utilisées dans ce mémoire.

Plusieurs effets macroscopiques résultants de la dégradation des fluides MR ont déjà été identifiés. La plus connue est l'« In-Use-Thickening » défini par Carlson[6] qui consiste en une augmentation importante de la viscosité apparente à cause du bris des particules de fer. Carlson a également établi une limite supérieure concernant la quantité d'énergie qu'un bon fluide MR peut dissiper, soit 10^7 J/ml. La polymérisation de l'huile de base peut aussi augmenter la viscosité apparente du fluide [8]. Une autre conséquence de la dégradation est une diminution de 20% de la contrainte de cisaillement maximale du fluide [9] qui se traduit par une baisse de couple dans le cas d'un embrayage. Cette conséquence est illustrée à la Figure 2.3. Selon les auteurs, cette diminution est liée à l'oxydation des particules de fer. Des

particules neuves et oxydées sont présentées à la Figure 2.4. Les fluides MR à base d'huile d'hydrocarbure sont sujets à générer de la pression à l'intérieur des embrayages MR [10]. Cette pression peut causer des fuites de fluide MR réduisant la durée de vie du fluide.

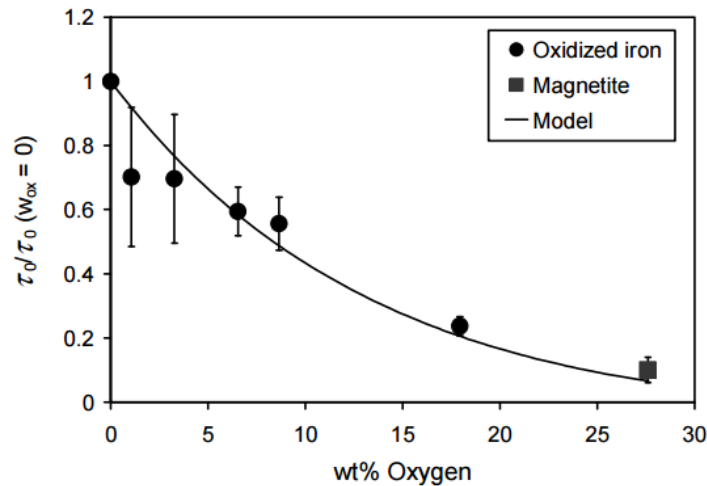


Figure 2.3 : Réduction de la contrainte de cisaillement en fonction du contenu en oxygène [9]

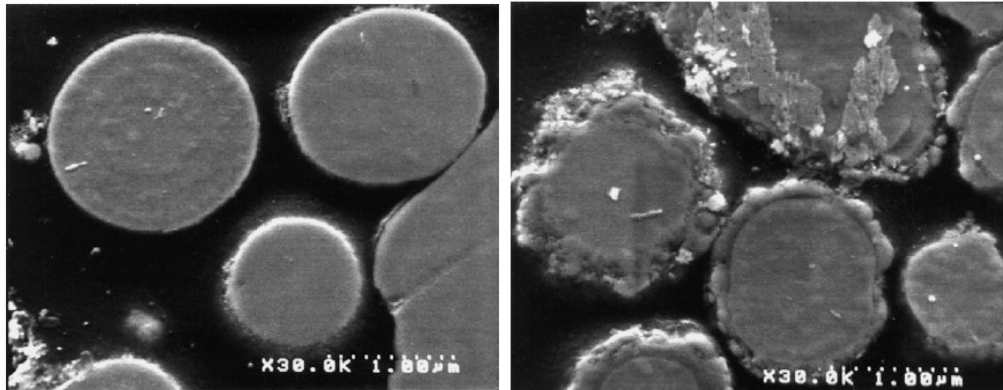


Figure 2.4 : Particules de fer neuves (gauche) et oxydées (droite) [9]

Plusieurs formulations ont été développées pour améliorer la durabilité des fluides MR selon leur domaine d'application. Par exemple, des fluides MR contenant une distribution bimodale de particules [11] ou des fluides MR utilisant des particules « dures » et « molles » [12] ont été testés pour réduire le bris des particules et ainsi repousser le phénomène de « In-Use-Thickening ». Afin de réduire la génération de pression liée aux huiles d'hydrocarbures, d'autres chercheurs [8] se sont concentrés sur la formulation d'une nouvelle base d'huile en utilisant une huile à base de Perfluoropolyéther (PFPE).

Les fluides MR ne présentent pas tous les mêmes modes de dégradation. Les modes de dégradation dominants dépendent de la composition du fluide et des conditions sous

lesquelles il est opéré (ex. : la température, l'intensité du champ magnétique, le taux de cisaillement). L'amélioration de la durabilité représente un défi de taille compte tenu de la diversité des compositions et des modes de dégradation.

2.2.2 Conception des embrayages pour la durabilité

La majorité des solutions développées pour améliorer la durabilité des fluides MR dans la littérature s'attaquent à la formulation du fluide MR lui-même, mais ce n'est pas la seule méthode qui permet d'améliorer la durabilité des embrayages MR. Une avenue qui est moins explorée pour améliorer la durabilité est de concevoir les embrayages afin minimiser la dégradation du fluide MR. Dans la littérature, il y a toutefois quelques avancées qui sont intéressantes au niveau de la conception d'embrayages. Premièrement, un embrayage MR refroidi à l'eau [13] a été testé afin d'abaisser la température d'opération. Le concept est présenté à la Figure 2.5. Il s'agit d'un embrayage à disque conventionnel qui contient plusieurs trous de circulation d'eau, une méthode de refroidissement conventionnelle.

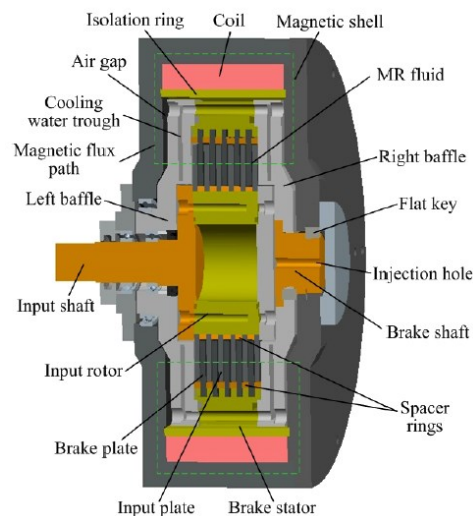


Figure 2.5 : Concept d'embrayage refroidi à l'eau [13]

Bien que le concept puisse être intéressant pour prolonger la durée de vie de l'embrayage, l'auteur a seulement testé la variation du couple de l'embrayage en fonction de la température. Le résultat et les causes de la réduction de couple mentionnés par l'auteur sont présentés à la Figure 2.6.

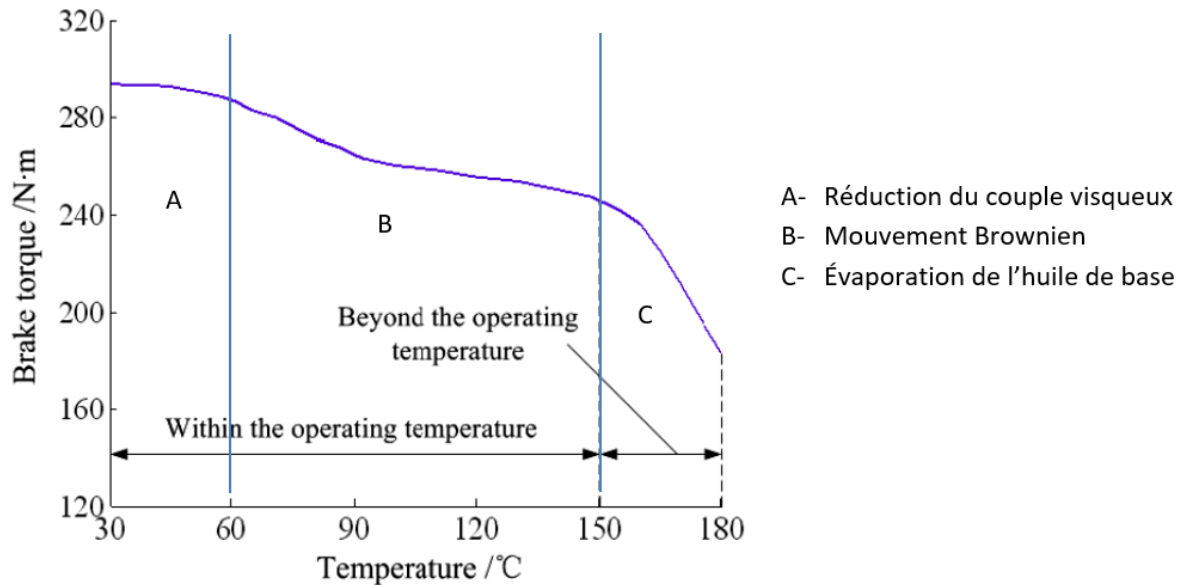


Figure 2.6 : Variation du couple en fonction de la température [13]

Dans la littérature, la grande majorité des articles traitant de la température affirment que les températures élevées réduisent la durée de vie des fluides MR comme le démontre la Figure 2.7 [14]. D'après cette figure, on s'aperçoit que l'effet du refroidissement des embrayages MR est très important. Le refroidissement de l'embrayage dans son environnement peut être simplement résolu par des méthodes de refroidissement traditionnelles (ex : refroidissement à l'air, à l'eau, à l'huile, etc.). Par contre, l'échange de chaleur entre le fluide MR (les particules et l'huile) et les surfaces de cisaillement est plus complexe et il pourrait être tout aussi critique pour la durabilité. Aucune publication n'a été répertoriée à ce sujet.

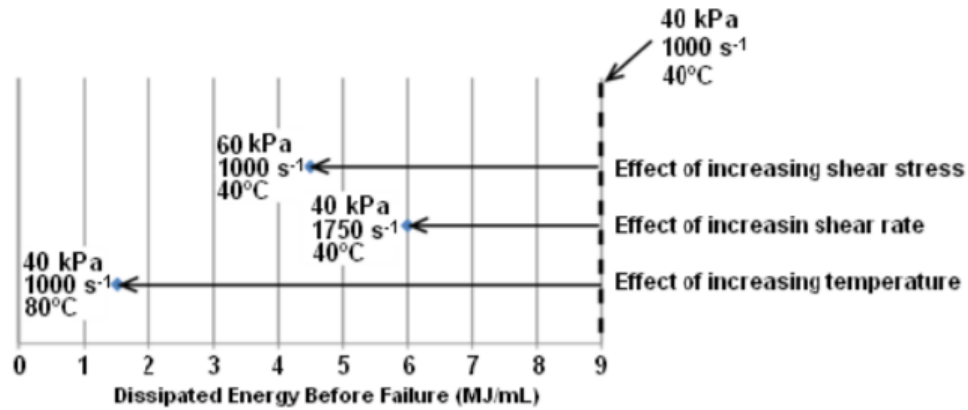


Figure 2.7 : Effet de la contrainte de cisaillement, du taux de cisaillement et de la température sur l'énergie totale dissipée par le fluide MR [14]

2.2.3 Concepts d'interfaces de cisaillement

Lors d'un projet antérieur, le laboratoire Créatek de l'Université de Sherbrooke [14] a incorporé des rainures dans un tambour d'embrayage MR comme présenté à la Figure 2.8. Cet ajout a permis d'augmenter la durabilité de l'embrayage par 60 %. Les résultats sont présentés à la Figure 2.9. L'auteur indique que les rainures ont pour effet de mélanger le fluide à l'intérieur de l'embrayage, permettant ainsi d'utiliser tout le volume de fluide MR disponible pour augmenter la durabilité. Toutefois, la cause de cette augmentation de durabilité n'a pas été spécifiquement démontrée théoriquement ou expérimentalement. L'approfondissement de ce concept constitue un des volets du projet de maîtrise présenté dans ce document.

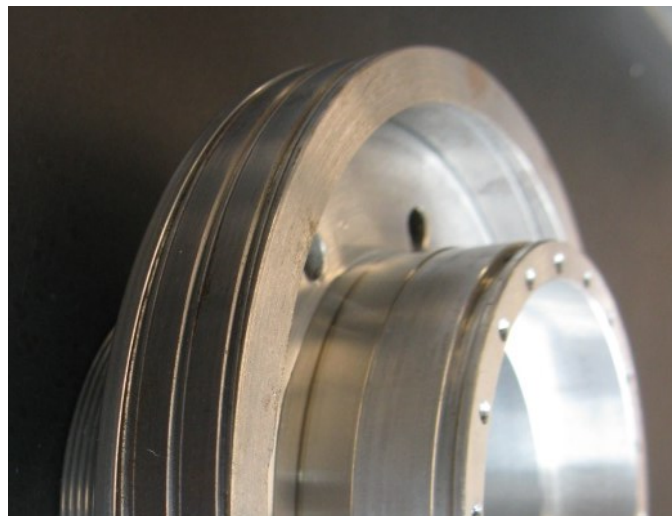


Figure 2.8 : Rainures ajoutées à un tambour d'embrayage MR

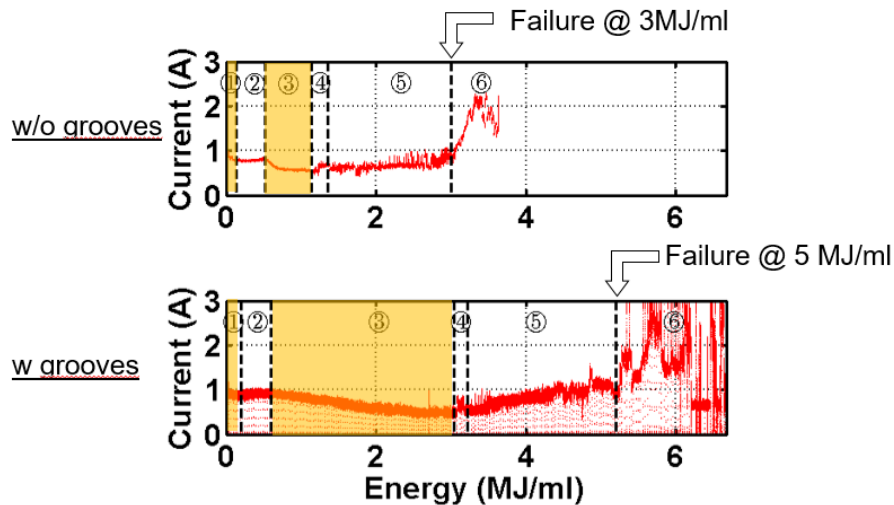


Figure 2.9 : Énergie (MJ/ml) dissipée dans l’embrayage avec un tambour lisse (haut) et muni de rainures (bas) [14]

2.2.4 Freins MR

D’autres concepts mécaniques visant à améliorer la durabilité ont été appliqués à des freins MR. Un frein MR fonctionne selon le même principe qu’un embrayage MR, mais leur chargement n’est pas similaire. Dans une application de frein, le fluide MR est très rarement sous l’influence du champ magnétique. Il est seulement sollicité pendant de courtes périodes de temps qui sont séparées par de longs intervalles. Toutefois, le fluide doit présenter les mêmes propriétés (viscosité, contrainte de cisaillement) à chaque fois que le champ magnétique est activé.

Pour une application de frein MR appliqué à une éolienne, un chercheur a volontairement induit des vortex de Taylor dans la zone de cisaillement d’un frein MR comme représenté à la Figure 2.10 [15]. Cet écoulement secondaire a créé un effet de brassage qui a permis d’assurer une homogénéité et un comportement stable du fluide MR dans le cadre d’un test de vieillissement accéléré. Il est intéressant de noter qu’un mécanisme de brassage est également exploité dans le cas de l’embrayage MR muni de rainures.

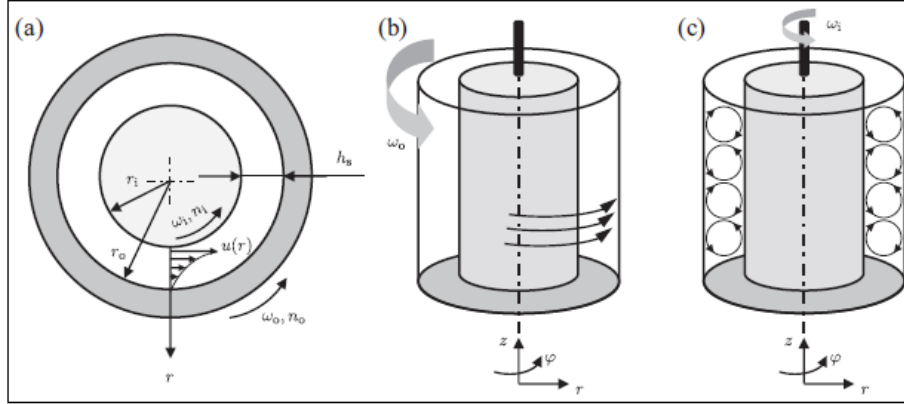


Figure 2.10 : Profil de vitesse (a), écoulement de Couette (b) et écoulement de Taylor-Couette (c) dans un frein MR [15]

La durée de vie obtenue pendant ce test représentait plus de 60 ans d'utilisation pour l'application spécifique de frein d'éolienne. Cette durée de vie correspond à une énergie dissipée d'environ 10^7 J/ml [16]. Cette valeur d'énergie dissipée correspond exactement à la valeur d'énergie mentionnée par Carlson [6] qui représente une durabilité standard pour un fluide MR. De plus, la puissance dissipée dans le fluide MR est faible, soit inférieure à 50 W [16].

Les vortex de Taylor ne seront pas étudiés comme solution potentielle dans le ce projet de maîtrise car sous l'effet du champ magnétique, la viscosité apparente du fluide augmente significativement. Ceci rend l'apparition des Vortex de Taylor impossible. Pour valider cette hypothèse, reprenons le critère utilisé par les auteurs pour évaluer la présence de vortex de Taylor dans l'embrayage de durabilité du laboratoire Créatek.

Le critère est basé sur le critère de Taylor et il permet de déterminer la vitesse de rotation critique à laquelle les vortex de Taylor apparaissent dans l'écoulement. Il est défini par l'équation 2.1.

$$n_{\text{crit}} = \left(41.1 + 14.5 \cdot \frac{h_s}{r_i} \right) \cdot \sqrt{\frac{r_i + r_o}{2 \cdot h_s}} \cdot \frac{\eta_M}{2\pi \cdot \rho_M r_i h_s} \quad (2.1)$$

Où n_{crit} est la vitesse de rotation critique, h_s la hauteur de l'interface de cisaillement, r_i et r_o les rayons intérieur et extérieur de l'interface de cisaillement, ρ_M la densité du fluide MR et η_M sa viscosité. Pour le calcul, η_M sera remplacé par deux valeurs de viscosité; μ , la viscosité du fluide MR en l'absence de champ magnétique et η , la viscosité apparente du fluide MR dans un champ magnétique de 0,5 T. Cette viscosité apparente a été calculée en divisant la contrainte

par le taux de cisaillement pour un point d'opération moyen de l'embrayage, tel que décrit par l'équation 2.2 :

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{33\,000 \text{ Pa}}{2167 \frac{1}{s}} = 15,2 \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad (2.2)$$

Les valeurs numériques sont répertoriées dans le tableau suivant pour l'embrayage de tests de durabilité et pour le fluide MR Lord 140CG.

Tableau 2.1: Valeurs numériques utilisées pour déterminer n_{crit}

Paramètres	Valeurs
h_s	0,0005 m
r_i	0,069 m
r_o	0,0695 m
μ (sans champ magnétique)	0,28 Pa s
η (avec champ magnétique 0,5 T)	15,2 Pa s
ρ_M	3640 kg/m ³
n_{crit} (sans champ magnétique)	172 rpm
n_{crit} (avec champ magnétique 0,5 T)	9340 rpm

Les vitesses de rotation critiques obtenues sont de 172 rpm en l'absence de champ magnétique et de 9340 rpm avec un champ magnétique de 0,5 T. En l'absence de champ magnétique, il serait possible de générer des vortex de Taylor puisque la vitesse obtenue est très proche de la vitesse de rotation utilisée actuellement (150 rpm). D'ailleurs, ce phénomène a été validé sans la présence d'un champ magnétique [15]. Toutefois, en présence d'un champ magnétique moyen (0,5 T), cela serait impossible puisque la vitesse de rotation critique est beaucoup trop élevée (9340 rpm).

Également pour une application de frein, les mêmes auteurs ont utilisé des aimants permanents pour retirer le fluide MR de la zone de cisaillement et ainsi éviter le frottement continu entre le fluide MR et les surfaces de cisaillement lors de l'absence d'un champ magnétique [17]. Une représentation de cette interface de cisaillement est présentée à la Figure 2.11. Le temps nécessaire pour faire la transition du mode complètement engagé à complètement désengagé est d'environ 50 ms. Ceci a permis d'augmenter l'efficacité de l'embrayage ainsi qu'à ralentir l'usure du fluide lorsque celui-ci n'est pas soumis au champ magnétique.

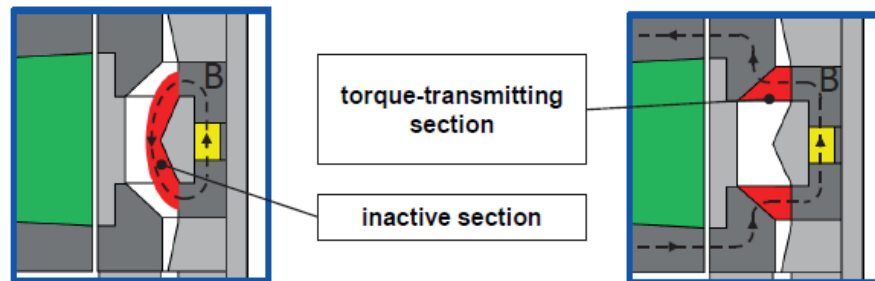


Figure 2.11 : Interface de cisaillement qui retire le fluide la surface en rotation. Le mode désactivé est présenté à gauche et le mode active à droite. [17]

Bien que le concept précédent soit intéressant pour une application de frein MR, il serait difficile à appliquer à un embrayage aéronautique puisque le champ magnétique de ces embrayages doit être activé et modulé en permanence.

2.2.5 Pompes et rainures

L'ajout d'une forme de pompe à un embrayage MR a déjà été proposé, mais les effets sur le mélange du fluide et sur la durabilité n'ont jamais été publiés. En 1947, une pompe externe a été brevetée par J. Rabinow [18] en mentionnant que le pompage améliorerait l'homogénéité du fluide MR. Le concept est illustré à la Figure 2.12. On y aperçoit la pompe et un enroulement de tuyaux (70) qui sert d'échangeur de chaleur pour refroidir le fluide MR. Toutefois, l'utilité de cette pompe externe n'a jamais été démontrée et elle présente des désavantages importants à cause de l'ajout de complexité et de masse.

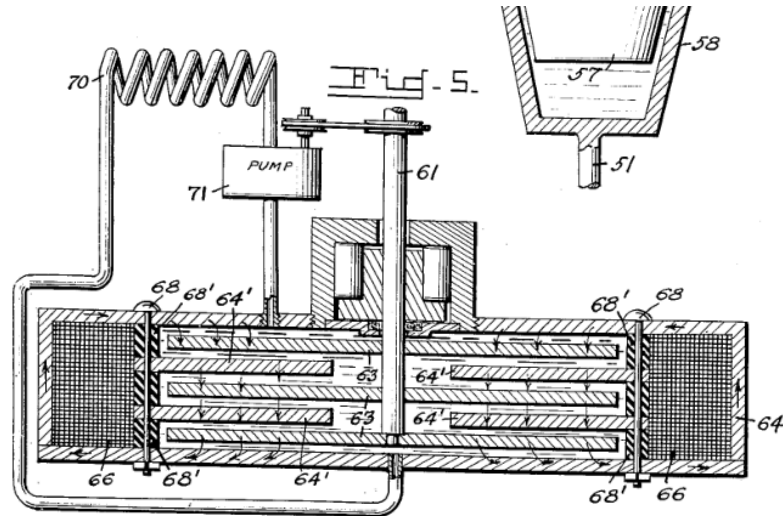


Figure 2.12 : Concept de pompe externe intégrée à un embrayage MR [18]

À la même époque, W. Winslow a breveté des embrayages magnétorhéologiques et électrorhéologiques (ER) équipés d'un mécanisme de rainure [19] qui est très similaire aux rainures utilisés dans ce projet de recherche. Le concept d'embrayage MR est illustré à la Figure 2.13 où on peut apercevoir les rainures dans le tambour de celui-ci. Dans le brevet, Winslow décrit également son hypothèse de la génération de débit par les rainures à l'aide de la Figure 2.14. Il indique que le coin entre la rainure et le plat (« c » sur la Figure 2.14) entraîne une forte concentration du champ magnétique au-dessus de ce point dans le fluide MR (« a » sur la Figure 2.14) et ceci crée un « mur » de fluide MR qui pousse le fluide MR situé dans la rainure et sur les portions plates du tambour. D'après les travaux réalisés dans ce projet de maîtrise, il est possible que l'hypothèse de Winslow soit fausse. Toutefois, il avait découvert qu'il était possible de pomper des fluides MR et ER grâce à un phénomène magnétique.

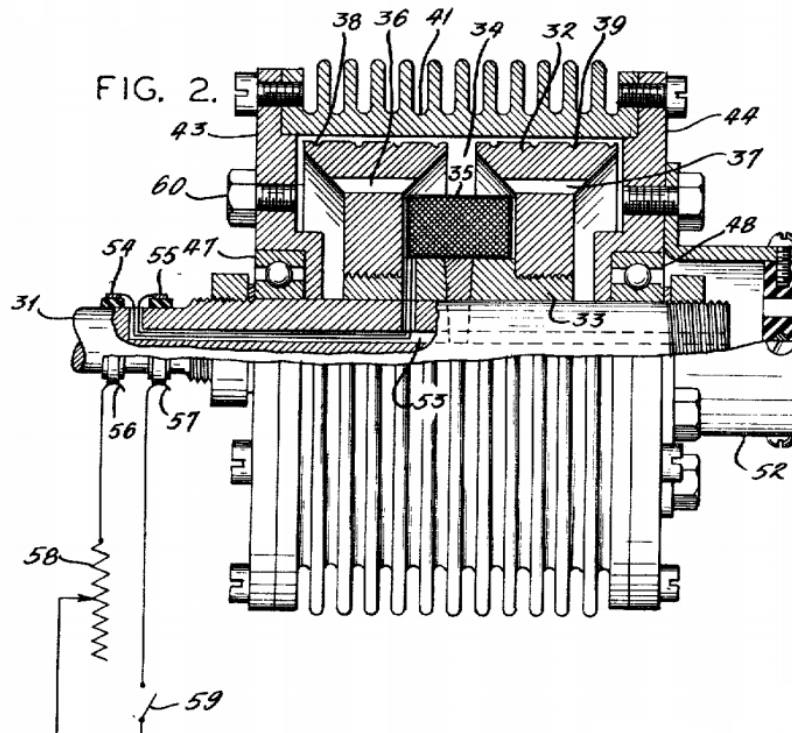


Figure 2.13 : Embrayage MR muni de rainures hélicoïdales (39) [19]

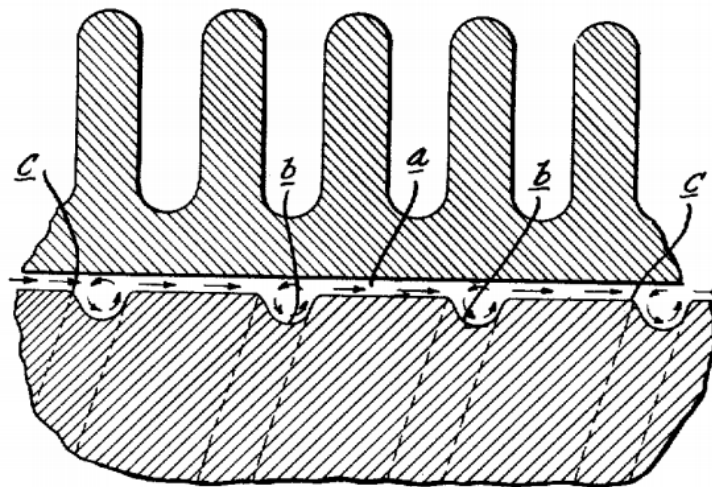


Figure 2.14 : Illustration du phénomène de pompage des rainures de Winslow [19]

Un autre mécanisme de circulation constitué de rainures a été proposé par Général Motors pour un embrayage de ventilateur de camion [20]. Il est illustré à la Figure 2.15. Les rainures portent le numéro 62A et elles sont situées sur les surfaces de cisaillement. Ces rainures auraient pour objectif de réduire les points chauds locaux et la formation d'amas de particules sur les surfaces de cisaillement.

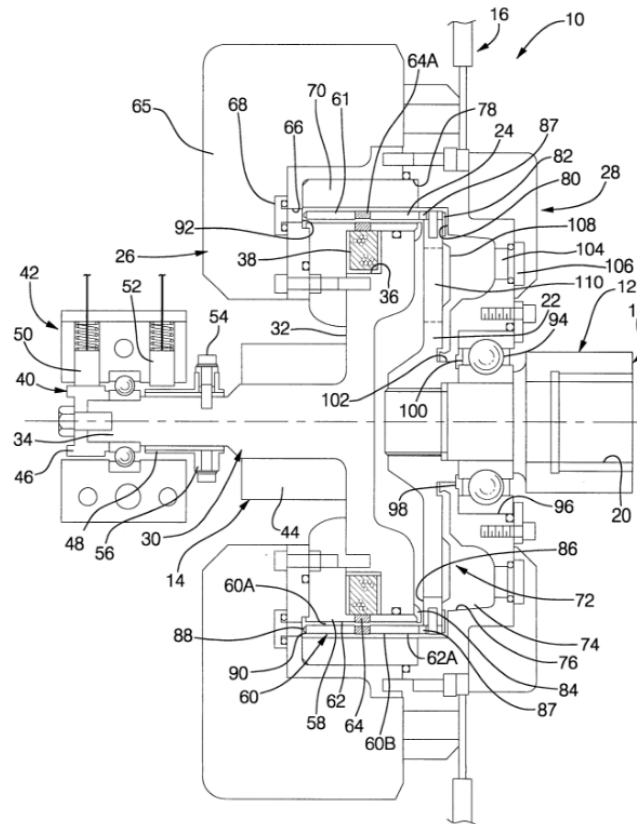


Figure 2.15 : Embrayage MR muni de rainures (62A) sur les surfaces de cisaillement

Il y a quelques années, le mécanisme pompe étudié dans ce projet de recherche a été breveté par l'Université de Sherbrooke. Le brevet [21] décrit l'invention où des rainures sont usinées dans les tambours d'un embrayage MR tels qu'illustrées à la Figure 2.16. Lors de la demande de ce brevet, le phénomène physique causant le pompage n'était pas connu, mais les inventeurs savaient que l'ajout de rainures produisait un débit. Le projet de recherche présenté dans ce mémoire a permis de mieux comprendre le phénomène de pompage.

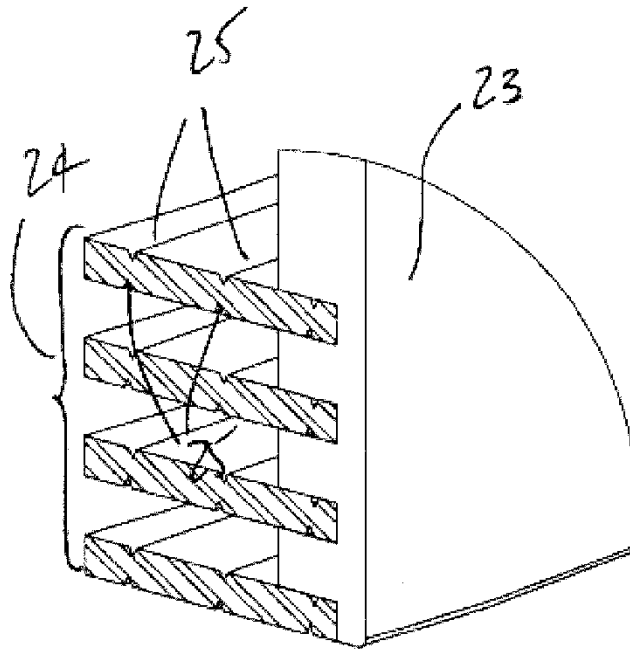


Figure 2.16 : Rainures (25) ajoutées aux tambours de l’embrayage breveté par l’Université de Sherbrooke [21]

2.3 Durabilité actuelle des fluides MR pour des applications haute puissance

À la connaissance de l’auteur, peu de tests de durabilité à hautes puissances (~ 1 kW) ont été effectués. La compagnie Général Motors a étudié ce sujet alors qu’elle développait l’embrayage MR pour un ventilateur de radiateur de camion [22]. Cet embrayage MR développait un couple de 40 Nm et fut testé en durabilité pendant 500 heures à une puissance variant de 1 kW à 5 kW alors que la température était maintenue aux environs de 100 °C. Le fluide MR utilisé était composé d’huile polyalphaoléphine et de particules de fer carbonyle à une concentration volumique de 42%. Des additifs étaient utilisés, mais ils ne sont pas mentionnés. Lors des tests de durabilité, une énergie dissipée de 73 MJ/ml fut atteinte. Cette valeur est environ sept fois supérieure à la valeur précédemment mentionnée par Carlson [6]. Les compagnies Magna et BASF ont également présenté un embrayage MR pour un système quatre roues motrices d’automobile [23]. L’appareil produisait 700 Nm, mais la puissance dissipée n’était pas mentionnée. Pour cette application BASF a développé un banc de test de durabilité pour fluide MR. Toutefois, le couple et la puissance de test semblent différents des requis du système quatre roues motrices. Une énergie dissipée de 2.5 MJ/ml fut réalisée pour un couple de 1 Nm et un taux de cisaillement de 200 s^{-1} , mais la composition du fluide MR n’est pas mentionnée. Dans une précédente étude sur la durabilité des fluides MR pour l’application

de contrôle des surfaces de vol [14], une énergie dissipée de 4.5 MJ/ml fut réalisée avec les fluides MR Lord 140CG et BASF 5030. Une puissance continue de 310 W était dissipée et une température moyenne de 40 °C était maintenue.

À la connaissance de l'auteur, les études mentionnées ici sont les seules qui traitent de la durabilité d'embrayages MR à haute puissance. Le peu d'applications à haute puissance démontre le défi lié à la durabilité des fluides MR.

2.4 Résumé de l'état de l'art

Suite à l'étude de la littérature, on s'aperçoit qu'il existe une grande quantité de cas de chargement et de formulations de fluide MR différentes. Cette diversité apporte plusieurs modes de défaillance différents du fluide MR. Par exemple, l'oxydation des particules, le bris des particules, la perte ou l'évaporation d'huile de base et la consommation d'additifs sont tous des modes de défaillance du fluide MR qui dépendent de l'application. Malgré ces différences, les MJ/ml sont largement utilisés pour quantifier la durabilité des fluides MR. Même si les unités sont les mêmes, la diversité des applications, rend la comparaison entre différentes recherches difficile. Il ne faut pas uniquement s'attarder à la valeur en MJ/ml, il est aussi nécessaire de bien comprendre le contexte des tests effectués.

Les fluides MR ont été popularisés par des applications à faible puissance (amortisseurs automobile, robots). Ces applications sont bien documentées, mais les applications d'embrayages à haute puissance (> 1 kW) sont moins discutées. En général, une augmentation de la puissance dissipée réduit la durabilité du fluide MR.

Les recherches portant sur la durabilité des fluides MR sont principalement concentrées sur la formulation des fluides MR et non pas sur la conception mécanique des embrayages comme il sera discuté dans ce document.

CHAPITRE 3

ARTICLE

Avant-propos

Auteurs et affiliation :

R. Pilon : étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

J-S. Plante : professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

J-P. Lucking-Bigué : étudiant postdoctoral, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

A. Landry-Blais : professionnel de recherche, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

A. Pin : étudiante à la maîtrise, Université de Sherbrooke, Faculté de génie, Département de génie mécanique

Date de soumission : 13 septembre 2018

Numéro de manuscrit : JIM-18-321

Revue : Journal of Intelligent Material Systems and Structures

Titre français : Pompe à vis magnétique pour améliorer la durabilité des embrayages magnétorhéologiques

Contribution au document :

L'article qui suit contribue au mémoire et décrivant la majorité du travail réalisé dans le projet de maîtrise. Les résultats principaux du projet y seront détaillés. De plus, la méthodologie complète des tests de caractérisation de la pompe et de durabilités est expliquée et les résultats expérimentaux sont comparés à un modèle théorique.

Résumé français

Les embrayages magnétorhéologiques (MR) sont de plus en plus utilisés dans des applications à haute puissance (~ 1 kW) qui nécessitent une méthode d'actionnement rapide (ex. : les suspensions actives, les robots industriels et le contrôle des surfaces de vols d'aéronefs). Ces applications entraînent une usure prématurée du fluide magnétorhéologique (huile et de particules de fer) contenu dans les embrayages. La durabilité des embrayages MR doit donc être améliorée. Pour répondre à ce besoin, les compositions de fluides MR ont été optimisées, mais peu de concepts d'embrayages ont été testés pour améliorer la durabilité. Pour ce faire, une hypothèse est de mélanger le fluide MR afin 1) de maintenir sa composition homogène, 2) de réduire sa température et 3) d'utiliser tout le volume de fluide disponible. L'objectif de cette recherche est donc d'étudier le potentiel d'un mécanisme de pompage qui favorise le mélange du fluide MR afin d'améliorer sa durabilité. Le concept de pompe proposé est similaire à une pompe à vis typique. Cependant, plutôt que d'avoir un filet métallique, la vis est générée par une structure 3D de fluide MR sous l'effet d'un champ magnétique concentré. Cette concentration de champ est produite par des rainures hélicoïdales usinées à même le tambour de l'embrayage.

La caractérisation expérimentale d'une telle pompe démontre qu'un débit de fluide MR important peut être atteint. Pour un embrayage contenant 50 ml de fluide MR, des débits allant jusqu'à 25 ml/min sont mesurés. Les relations pression-débit obtenues expérimentalement sont comparées à un modèle de pompe à vis typique. Toutefois, le modèle représente mal des résultats expérimentaux et un nouveau modèle semi-empirique est proposé. Les résultats montrent que le nombre de rainures, l'intensité du champ magnétique et la vitesse de rotation ont le plus grand impact sur la pression et le débit.

Deux essais de durabilité sont effectués en utilisant le fluide MR Lord 140CG. Dans le premier test, l'embrayage est équipé d'un tambour rainuré pour favoriser le mélange et l'autre test est effectué avec un tambour lisse standard. Les résultats expérimentaux démontrent que le concept de pompe proposé permet d'augmenter la durabilité par 45% en comparaison à un embrayage MR à tambour lisse. Ceci confirme qu'un tel dispositif est pertinent pour les applications d'embrayages MR durables à haute puissance.

Note : À la suite des corrections demandées par les membres du jury, le contenu de cet article diffère de celui présenté à la revue.

A magnetic screw pump for durability enhancement of MR clutches

3.1 Abstract

Magnetorheological (MR) clutch durability is a challenge because of the continuous slippage in the clutch shear interface. The need for better durability is even greater in high power applications (~ 1 kW), such as powertrain clutches and aircraft flight controls.

To improve durability, this research studies the potential of using a pumping action to promote fluid mixing within a MR clutch. The proposed concept is a screw pump where the flights are made of MR fluid, submitted to a concentrated magnetic field. This concentration is generated by helical grooves machined into the drum of the clutch.

Experimental data shows that the magnetic screw pump achieves flow rates up to 25 ml/min for a clutch containing 50 ml of fluid. The pump doesn't display the same flow behavior as a typical screw pump because of the limited yield stress of the MR fluid flights. The number of grooves, magnetic field intensity and rotational speed have the biggest impact on the induced flow.

Durability test results show that the magnetic screw pump has the potential to increase durability by 45% when compared to a standard MR clutch, confirming that such a device is relevant for durable and high power MR clutch applications.

Keywords : Magnetorheological, clutch, fluid, durability, screw, pump

3.2 Introduction

3.2.1 Motivation

Magnetorheological (MR) actuators that rely on MR clutches have recently gained interest in various fields due to their good dynamic response compared to other actuation methods. The continuous slippage actuator architecture (CSA) is especially well suited for applications that require fast dynamics [4]. This MR clutch configuration is characterized by the continuous slippage between the constantly rotating input shaft and the output. During operation, the torque transmitted to the output is constantly adjusted by the modulation of the magnetic field intensity. The fast dynamics of MR clutches coupled with their fundamental robustness and reliability due to the absence of metal-metal contacts show great potential for the aerospace industry. A possible aerospace application is the actuation of primary flight control

surfaces of aircrafts [5]. However, given the dissipative nature of MR clutches in the CSA architecture (MR fluid being under continuous slippage), MR fluid durability represents an important challenge. This is especially true in Magnetorheological fluid (MRF) applications where medium to large power are dissipated in the fluid (~1 kW).

3.2.2 Background and literature

Multiple failure modes regarding MR fluid durability have previously been identified in the literature. In-use-thickening was observed in MR dampers, where iron particles would break down into smaller particles causing an increase in off-state viscosity, and making the device unusable [6]. In high temperature applications, iron particles are also subject to oxidation, resulting in reduced MR fluid shear stress proportionally to the oxide content of the particles [24].

Silicon oil based MR fluids were prone to base oil polymerization, which also causes a fast viscosity increase [6]. With other types of base oil, such as polyalphaolefin and perfluorinated polyether (PFPE), polymerization is not an issue. However, petroleum based MR fluids have a tendency to cause pressure build-up in MR devices which can induce leaks and reduce durability [10], [14]. To avoid these pressure build-ups, perfluorinated polyether based MR fluids have been tested [8].

Not all MR fluids exhibit the same failure modes. The dominant failure modes generally depend on the MR fluid composition and the conditions in which the fluid is operated (e.g.: temperature, magnetic field intensity, shear rate)[14]. The diversity of MR fluid compositions and failure modes makes the question of MR fluid durability a challenging one.

Typically, the durability of MR fluids is quantified by the lifetime dissipated energy (LDE) [6]. LDE is the ratio of the total energy dissipated in a MR fluid divided by the volume of MR fluid. It is expressed in MJ/ml.

To the authors' knowledge, a limited number of high power MR clutch applications have previously been tested for durability. General Motors researched the subject when developing a MR fan drive for trucks [22]. Their MR clutch produced a torque of 40 Nm and was tested for durability for 500 hours at powers ranging from 1 kW to 5 kW while temperature was maintained over 100°C. The MR fluid was a mix of polyalphaolefin oil, carbonyl iron particles (42% vol.) and proprietary additives. During the durability tests this fluid reached a LDE of 73 MJ/ml which is approximately seven times the value mentioned previously by Carlson of 10 MJ/ml [6].

Magna and BASF introduced a MRF-based clutch for automotive all-wheel drive systems [23]. The device produced a torque of 700 Nm but there is no mention of power. Nevertheless, BASF

developed a test cell to quantify the durability of MR fluids. Although the torque and power of this test cell differs from the 4WD-clutch requirements, a durability of 2.5 MJ/ml was achieved for a torque of 1 Nm and shear rate of 200 s⁻¹, but there is no mention of the MR fluid tested.

In a study on the aging of MR fluids for aircraft primary flight controls application, a LDE of 4.5 MJ/ml was reached using Lord 140 CG and BASF 5030 MR fluids [14]. A continuous power dissipation of 310 W was used and the average temperature was maintained at 40°C by water cooling.

While adequate durability was achieved for damper applications [6], a relatively small number of MR clutch durability tests have been documented in literature and MRF durability remains a challenge in the most demanding applications. MR fluid durability has improved over the years, but other than improving MRF formulations, there is no specific MR clutch design feature to improve it. An external pump has previously been patented suggesting that the pumping action would improve MR fluid homogeneity [18]. However, the external pump approach was never demonstrated and presents major drawbacks in terms of weight and complexity. A MR fluid circulation mechanism based around grooved surfaces has also been integrated to a MR clutch [20]. It is claimed that the circulation of MR fluid reduces the occurrence of hot spots and lessens the build-up of iron particles on the shear surfaces. In a previous study by some of the authors [14], MR fluid durability was improved by circulating MR fluid. However, the circulation mechanism is not described.

3.2.3 Approach

This paper studies the potential of using a screw pumping action to promote MRF mixing in order to increase durability of MR fluids. The pumping concept proposed in the paper is similar to a typical screw pump (ex: for plastic extrusion) but instead of having solid flights, the flights are generated by 3D structures of MR fluid formed under the effect of a concentrated magnetic field as shown on Figure 3.1.

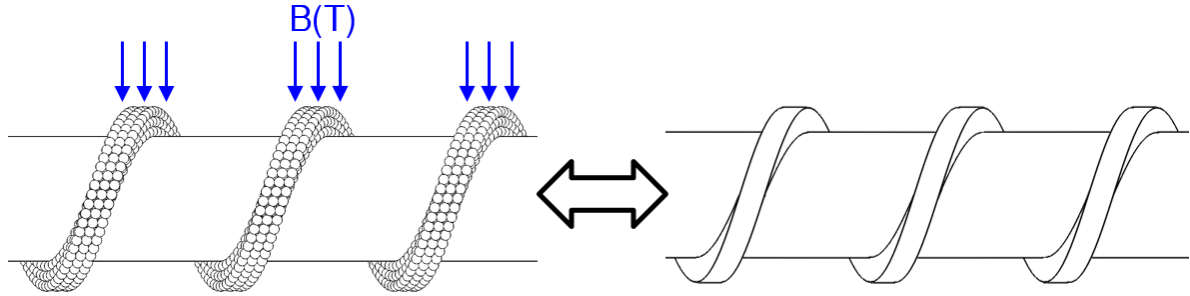


Figure 3.1 : Magnetic screw pump concept (left) compared to a typical screw pump (right).

The magnetic field concentration is induced by a series of helical grooves machined into the drum of the MR clutch. This generates a solid MR fluid structure following a helical pattern. The MR fluid located in the machined grooves is un-magnetized (or slightly magnetized) and is transported by the solid structures on either side. The main advantage of this design is that it requires no extra part, which could otherwise compromise reliability. By circulating the MR fluid through the shear zone of the MR clutch, the total energy is dissipated in a larger quantity of fluid than if there was no mixing, thus having the potential to increase durability. It could also potentially reduce MR fluid temperature.

Specifically, section III describes the proposed MR fluid flights screw pump design with the MR fluid clutch in which it is implemented. Section III also proposes a simple analytical screw pump model in an attempt to estimate flow rates. Section IV describes the experimental setups for flow and durability characterization. Section V presents the experimental results. The experimental characterization of the screw pump is presented in section V where flow rates up to 25 ml/min are measured confirming the pumping action of the magnetic screw pump. It is shown that the number of grooves, magnetic field intensity and rpm have the biggest impact on pump pressure and flow rates. The differences between the experimental results and the typical screw pump model results of section III are highlighted. To provide a better model, a semi-empirical flow model is proposed. Section V also presents the effect of the magnetic screw pump on the torque output of the clutch. In the last portion of section V, the pump is installed in the MR clutch and its impact on MR fluid durability is investigated by comparing it with a standard smooth drum clutch. Section VI discusses the results and the different uncertainties and coupled effects impacting durability are mentioned. Finally, other potential applications of the MR flights screw pump are proposed.

In this paper, the pumping action is investigated using Lord 140 CG MR fluid. Specifically, section III describes the proposed MR fluid flights screw pump design with the MR fluid clutch in which it is implemented. Section III also proposes a simple analytical screw pump model in an attempt to estimate flow rates. Section IV describes the experimental setups for flow and

durability tests. Section V presents the flow and durability results. The pressure-flow characteristics of the screw pump are presented confirming the pumping action of the pump. It is shown that the number of grooves, magnetic field intensity and rotational speed have the biggest impact on pump pressure and flow rates. The differences between the experimental results and the typical screw pump model results of section III are then highlighted and a more appropriate semi-empirical flow model is proposed. This section also presents the effect of the magnetic screw pump on the torque output of the clutch. In the last portion of section V, the pump is installed in the MR clutch and its impact on MR fluid durability is investigated by comparing it with a standard smooth drum clutch. Section VI discusses the results and the different uncertainties and coupled effects impacting durability are mentioned. Finally, other potential applications of the magnetic screw pump are proposed.

3.3 Magnetic screw pump design

3.3.1 Principle of operation

Adding grooves in the drum of a MR clutch creates a local reluctance in the magnetic field path and causes the flux lines to go around the grooves. The resulting magnetic field distribution for a MR fluid gap with a grooved drum is illustrated on Figure 3.2. This results in a very low magnetization of the MR fluid contained in the groove while the portion of MR fluid located between the grooves remains strongly magnetized to maintain the clutch's primary functionality of transferring torque.

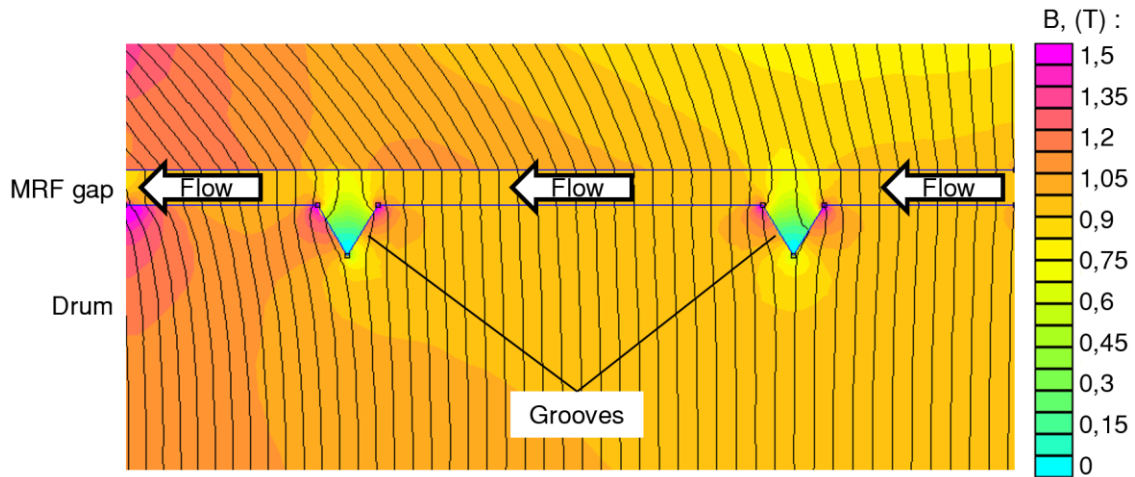


Figure 3.2 : Grooved drum magnetic field distribution finite element analysis under FEMM.

As shown on Figure 3.3, the grooves follow a helical path around the drum. Based on the screw extruder principle, the un-magnetized MR fluid contained into the grooves is transported by

the magnetized MR fluid flights as the drum rotates. This generates a flow of less-magnetized MR fluid from the inlet to the outlet of the drum. This flow of MR fluid has the potential to promote MR fluid mixing in a MR clutch to reduce the residence time of MR fluid in the shear zone and to effectively use all the MR fluid contained in a clutch, thus potentially increasing MR fluid durability.

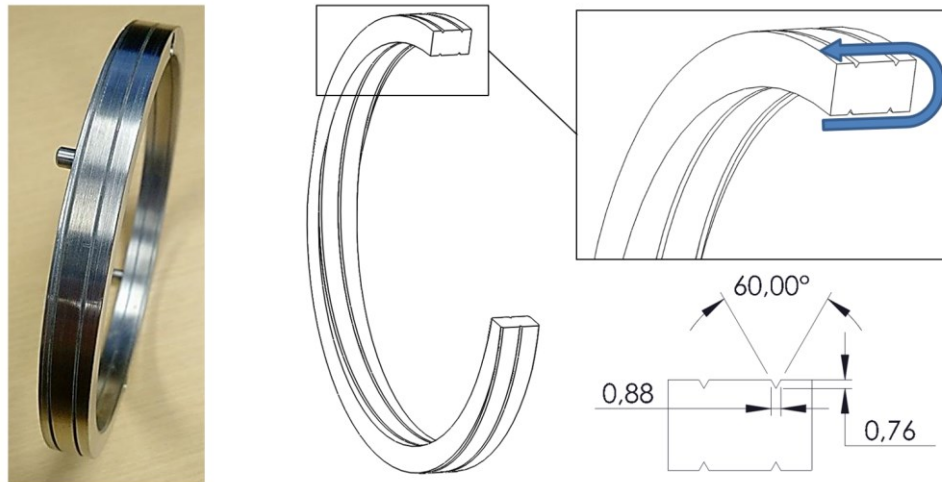


Figure 3.3 : Picture (left) and partial cross section (right) of a grooved drum with two grooves and a pitch of 12.7 with its dimensions. The blue arrow represents the MR fluid path when the drum is installed in a MR clutch.

3.3.2 MR Clutch

The grooved drum is installed in the MR fluid aging clutch presented on Figure 3.4. This clutch was designed specifically to perform MR fluid durability tests, so ease of disassembly was prioritized in order to minimize downtimes between tests. The clutch is a drum type clutch comprising two shear interfaces. As seen on Figure 3.4, the drum (dark green) is connected to a rotor (light green) which is driven by the input shaft of the clutch (red). The magnetic circuit (blue) is connected to the main casing of the clutch (grey) which houses the water cooling circuits. The clutch casing is mounted on bearings and its rotation is blocked by a load cell through a lever arm in order to measure its torque. The architecture (blocked output) of this clutch is more similar to a MR brake, but for consistency it will be called a clutch in this paper. Since the clutch casing is stationary and the drum is always rotating, this configuration is the worst case scenario in terms of durability because of the continuous slippage in the shear interface.

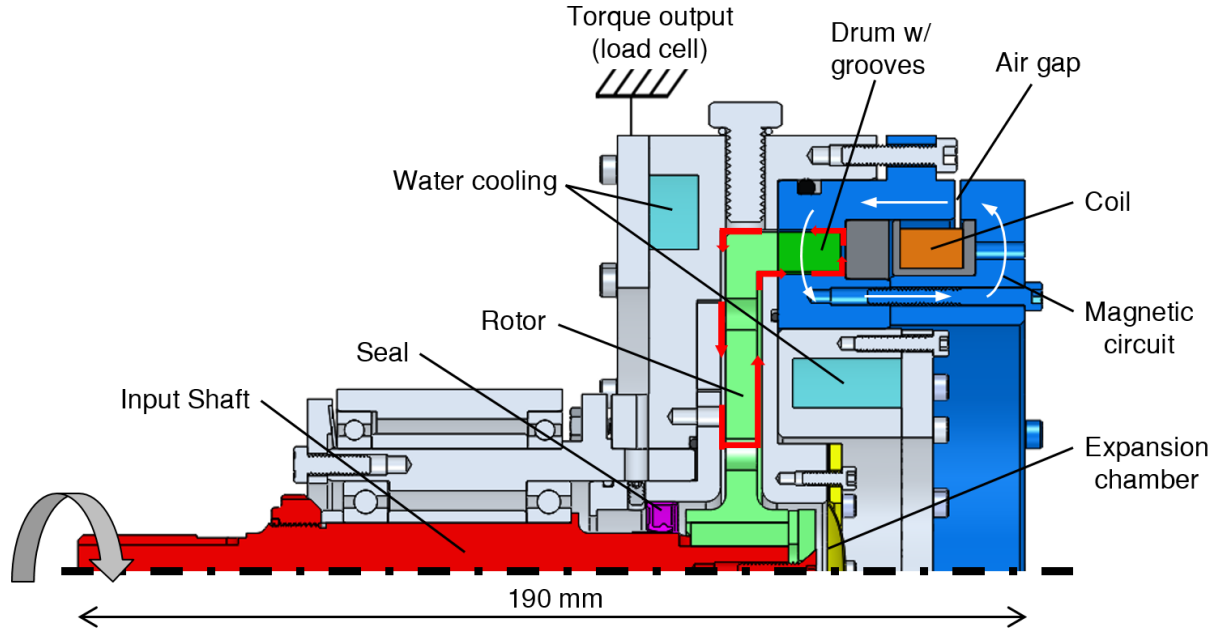


Figure 3.4 : MR fluid aging clutch cross section. The MR fluid recirculation path is represented by the red arrows. The white arrows represent the magnetic field path.

The screw pump design consists of a series of helical grooves machined on the inner and outer surfaces of the drum, similar to a screw thread. Figure 3.3 shows the partial cross section of a grooved drum with two 12.7 mm pitch grooves on each drum surface. The grooves dimensions are small compared to the drum size, they are of triangular shape with a 60° angle and their depth is 0.76 mm and their width is 0.88 mm.

The design parameters of the aging clutch are presented in Table 3.2. This clutch is an improvement from the aging clutch presented in a previous paper [14]. It features the same shear zone geometry, but the dead zone MR volume was enlarged to 50 ml and the diameter of the bearings was greatly reduced. In an effort to reduce the potential for MR fluid leakage, it features a single seal, with a reduced diameter of 15.9 mm ID. The diameters of the outer and inner shear zones are 137.5 mm and 121.5 mm respectively, while the width of the drum is 12.7 mm and the gap height is 0.5 mm. This configuration provides an average shear rate (between the two shear interfaces) of 2750 s^{-1} at 200 rpm. The clutch is water cooled to ensure that the desired test temperature is maintained. During durability tests, the average temperature was maintained at 30°C. An expansion chamber is added in order to mitigate clutch pressure increases from thermal expansion and possible MR fluid outgassing. It is made of a 0.0625" thick fluorosilicone membrane that expands under pressure.

Table 3.2 : Aging clutch specifications

Clutch Characteristic	Specification
Clutch type	Drum
Total MRF volume	50 ml
Shear zone MRF volume	8 ml
Dead zone MRF volume	42 ml
Shear zone magnetic field	0.8 T max
Average shear rate	0-2750 s ⁻¹
Cooling method	Water cooled
Dynamic seal	1 x SKF 6191
Coil turns	220
Maximum torque	50 Nm @ 4 A
Maximum power	1 kW

3.3.3 Analysis

A simple model is built around typical extruder screw theories in order to estimate the flow rates generated by the magnetic screw pump [25]. From Figure 3.2, it is supposed that the slightly-magnetized MR fluid located into the grooves is transported by the magnetized MR fluid which acts as solid screw flights. Figure 3.5 illustrates this hypothesis where the magnetized MR fluid particles form the screw flights and the yellow regions is the transported MR fluid. Following simplified screw extruder theories, a Couette flow is assumed into the groove with a linear velocity profile. The pumping flow rate generated by the Couette flow can be evaluated using equation 3.1.

$$Q_{\text{Couette}} = \frac{nb A \pi D \text{ rpm} / 60 \cos(\alpha)}{2} \quad 3.1$$

where,

nb is the number of grooves,

A is the area of the unmagnetized MR fluid (yellow on Figure 3.5),

D is the inside diameter of the drum,

and α is the angle of the groove

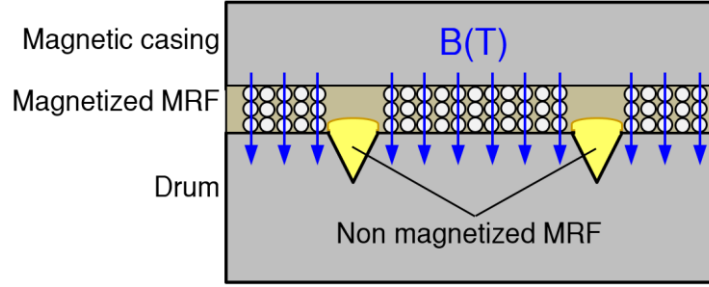


Figure 3.5 : MR fluid transport hypothesis. Yellow fluid is un-magnetized and transported by solidified MF fluid particles which act as the screw flights.

Since there is a pressure differential between the two sides of the drum (screw), a pressure flow, or Poiseuille flow, is generated that acts against the Couette flow. It is assumed that this Poiseuille flow is also located between flat plates. The resulting backflow rate, in ml/min is given by equation 3.2.

$$Q_{\text{Poiseuille}} = \frac{P w h^3}{12 \mu L} \quad (3.2)$$

where,

P is the pressure differential between the two sides of the screw

w is the width of the unmagnetized MR fluid (width of the groove)

h is the height of the unmagnetized MR fluid (depth of the groove)

μ is the viscosity of the MR fluid

and L is the length of the groove that follows the helix of the screw.

The total flow rate is then described by equation 3.3.

$$Q_{\text{Total}} = Q_{\text{Couette}} - Q_{\text{Poiseuille}} \quad (3.3)$$

The resulting flow rates and pressures are illustrated on Figure 3.6 for a drum featuring two grooves and a pitch of 12.7 mm for different rotationnal speed. From the figure, we can see that the maximum flow rate and pressure increase linearly with RPM.

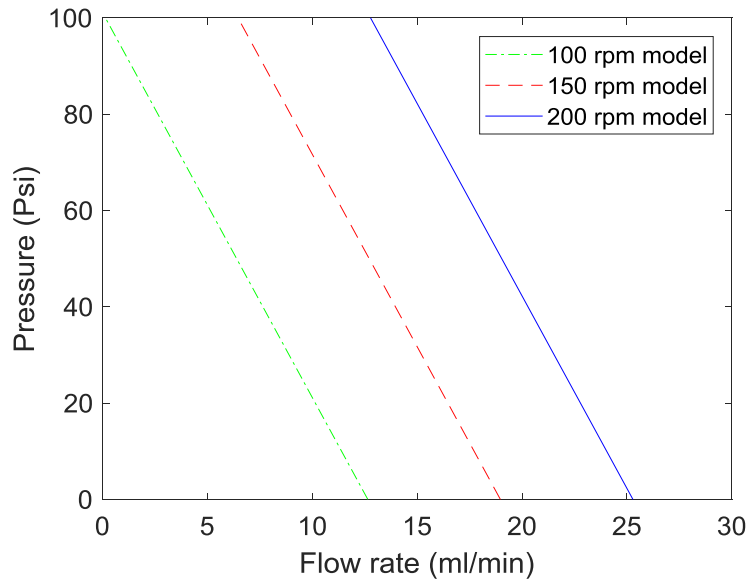


Figure 3.6 : Analytical model results for a drum with two grooves and a pitch of 12.7 mm.

3.4 Experimental setup

To quantify the magnetic screw pump flow and MR fluid durability, a test bench was built. The test bench is equipped with a MR clutch and sensors to monitor the macroscopic effects of fluid degradation over time. The same test bench was used for the flow characterization and the durability tests.

3.4.1 Experimental setup (test bench) and sensors

The MR fluid aging clutch is installed on an aging test bench and is driven by a 1,1 kW motor (Sumitomo Cyclo 6000) with a variable speed between 0 to 200 rpm. The test bench is equipped with a National Instruments Compact RIO-9022 for control and data logging. The torque of the clutch is measured through its lever arm by a Transducer Techniques MLP-300 load cell and it is controlled by a closed loop controller. Clutch pressure is monitored by a 15 psi SSI Technologies pressure transducer. The clutch is equipped with three thermocouples in order to estimate the heat distribution around the shear zone. Two solid thermocouples are located inside and outside of the shear zone in the magnetic circuit. The third wire type thermocouple is located in the rotating drum. Its wire is routed through the rotor and shaft. Exiting at the end of the shaft, it is then connected to an Omega Miniature Portable Wireless Thermocouple Connector and Data Logger. The wireless connector is mounted on the rotating clutch shaft and its signal is sent to an Omega wireless receiver which is wired to the data acquisition system. This last thermocouple monitors the temperature of the rotating drum in

order to evaluate if MR fluid circulation affects shear zone temperature by improving heat and mass transfer. The clutch is also equipped with a in-house made magnetic field sensor based around the CYSJ106C chip from ChenYang. This sensor is inserted in an annular air gap located in the magnetic circuit (see Figure 3.4). During the aging test, the clutch temperature is maintained constant by an industrial chiller (Cornelius CH1500) that is able to cool under ambient temperature, insuring that the clutch maintains a temperature of 30°C, regardless of power dissipation through the MR fluid.

3.4.2 Flow tests methodology

The flow characterization test setup is shown on Figure 3.7. An inlet tank containing Lord 140CG MR fluid is connected to the center of the clutch (instead of the expansion chamber) through a 0.375" ID hose. The fluid flows from the inlet tank to the clutch. Once in the clutch, the MR fluid is forced to travel radially from the center of the clutch to the shear zone by traveling at the right of the rotor (the rotor re-circulation holes are blocked). Then, it is pumped around the drum by the magnetic screw pump. Finally, it exits the clutch (on the left side of the rotor) through a second hose of 0.375" ID and falls in the outlet tank placed on a scale. At the end of the outlet hose is placed a restrictor to limit flow and increase pressure inside the clutch. Four restrictor sizes (0.375", 0.06", 0.04" and 0") were used in the tests. The first is the 0.375" tube itself, then two aluminum restrictors with holes of 0.06" and 0.04" were inserted into the outlet hose. The fourth restrictor is simply an aluminum plug (no hole) inserted into the hose. Clutch pressure is measured using the test bench pressure transducer installed just after the magnetic screw pump (the drum) at the top of the clutch in order to measure the total head loss between the end of the output tube and the drum.

Drums of different geometries were tested for flow. Every drum was tested with the four restrictors. Every restrictor was tested with rotational speeds of 100, 150 and 200 rpm. Then for every speed, the tested currents were 1, 2, 3 and 4 A. After the characterization of each drum, a total of 48 data points were obtained. For every data point, the test lasted approximately two minutes. After two minutes, the weight displayed on the scale was divided by the elapsed time and the resulting average flow rate was recorded manually. Pressure was recorded automatically for the complete test duration on the data acquisition system. The last minute of pressure recording was quasi constant and it was averaged to obtain a unique pressure value.

Viscosity tests were performed periodically to ensure that off-state viscosity didn't change significantly from one test to another. To perform this measurement, no current is applied to the coil and the rotation speed is linearly decreased from 150 to 0 rpm while torque is measured. This method is not absolute because drag torques from the bearings and seal is

measured simultaneously with fluid viscosity. Nonetheless, it gives a good estimation of the relative off-state apparent viscosity.

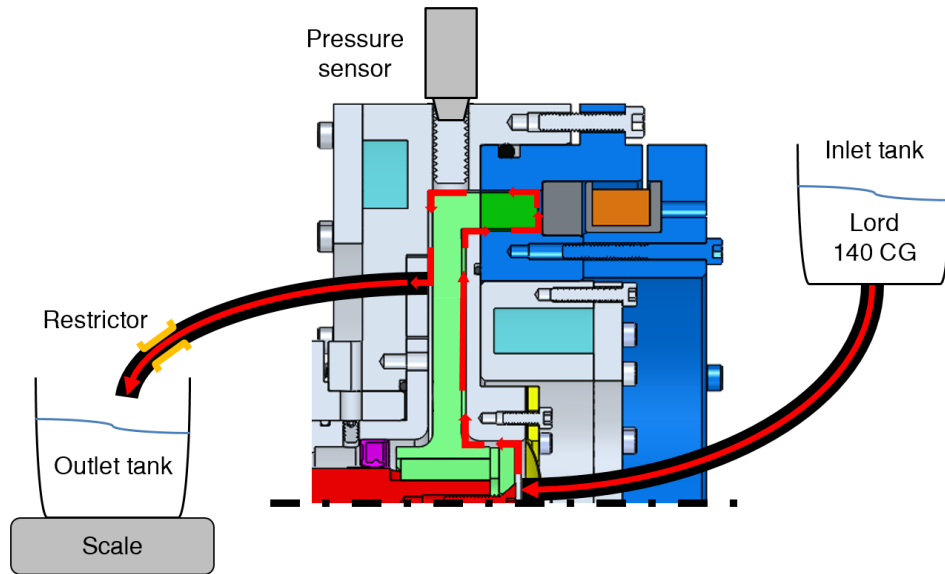


Figure 3.7 : Flow rate measurement test setup.

3.4.3 Durability test sequence

The durability tests presented in this paper were performed on the same test bench. Durability tests all follow the same two phases sequence illustrated on Figure 3.8. This methodology has been described previously [14], but is repeated here for completeness. The first hour of the test is the MRF aging phase where a constant 20 Nm torque reference is set while the current command is adjusted by the closed-loop controller. After one hour, the test sequence switches to the 30 seconds open loop characterization phase, where current steps of 1, 2 and 3 A are imposed and the resulting torque is measured and recorded while the speed is maintained at 150 rpm. The current steps have a duration of 2 seconds. Then, the off-state apparent viscosity is measured following the same procedure as previously explained in the flow test methodology. After the characterization phase, the sequence goes back to the aging phase and so on.

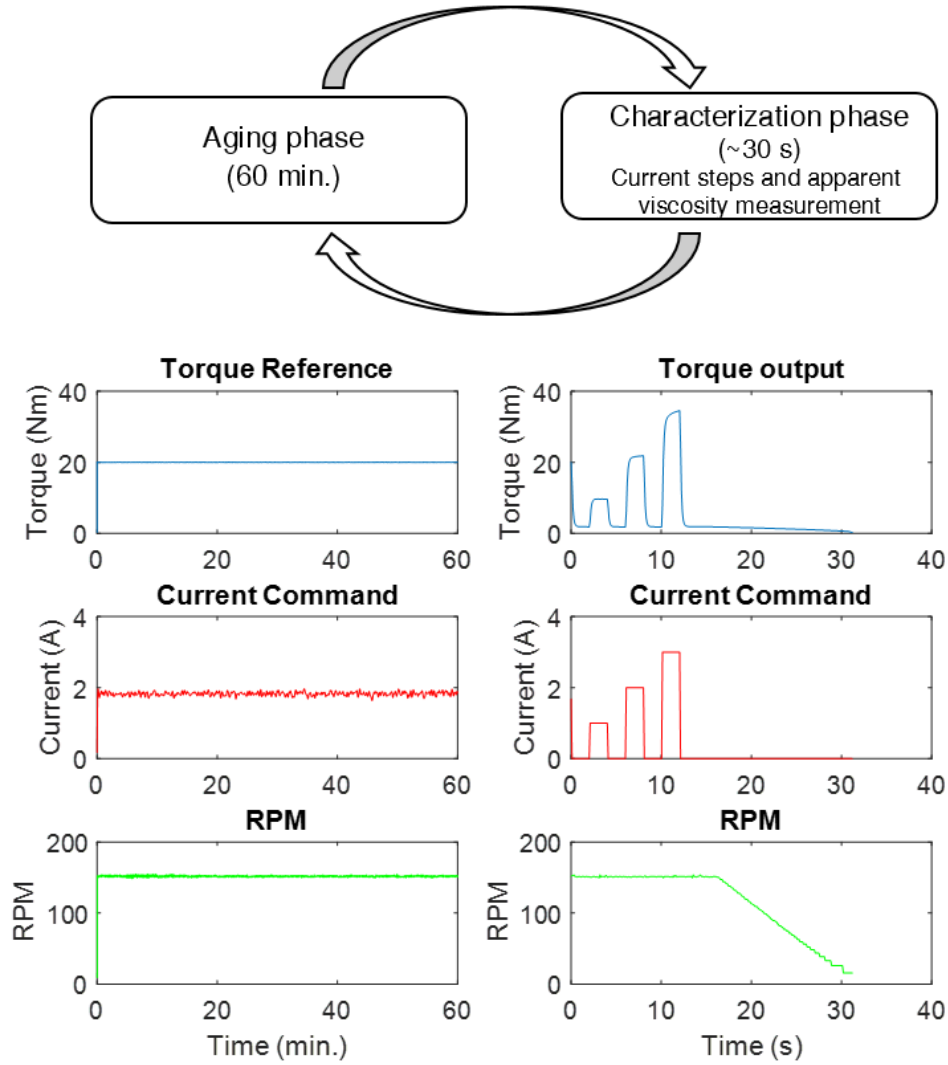


Figure 3.8 : Durability test sequence.

To compare significant LDE values between different durability tests, we need to establish a common test failure criterion. Typically, the measured torque for a given current step value decreases as more energy is dissipated in the MR fluid (as LDE increases). Observing this torque decrease, the chosen criterion is based on the 3 A current steps from the transient characterization test. When the torque of the 3 A current step reaches 80% of the initial torque (at 0 MJ/ml) at 3A the test is considered finished. This means that the final LDE value of a given durability test is fixed when the torque at the 3A current step is 20 % lower than the measured torque at the initial 3A current step.

3.5 Test Results

3.5.1 Flow tests results

In total, three drums were tested for flow. Figure 3.9 presents the pressure-flow diagrams for the drum used in the durability tests for different coil currents (1 A to 4 A). This drum featured 2 grooves and a pitch of 12.7 mm. As seen from Figure 3.9, the static pressure at 0 ml/min increases almost linearly with coil current. Flow rate also increases with coil current, but it is also speed dependent which is similar to a typical screw pump.

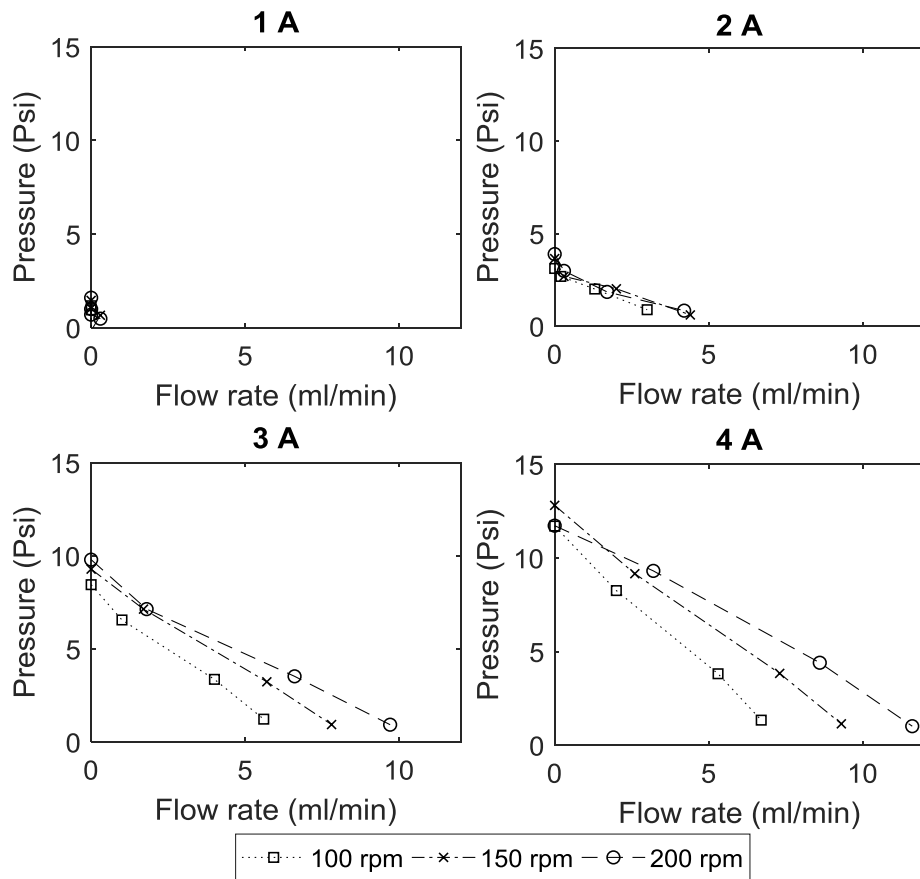


Figure 3.9 : Pump diagram of the 2 grooves and 12.7 mm pitch drum.

Results at 0 A were tested but are not presented here because the flow rates and pressures were zero. The results at 1A show very small pressures and flow rates because at this level of magnetization the shear stress of the fluid is not sufficient to overcome the head loss of the hydraulic circuit. On the 2 A subplot, pressure and flow rate start to become significant as the generated pressure overcomes the hydraulic circuit head loss. The 3 A and 4 A subplots start to show a pump behavior where flow rate increases with rotation speed. Comparing all subplots, we observe that both pressure and flow rate increase with increasing current.

To make sure that the pumping effect is not a result of centrifugation, a flow test was conducted with a smooth drum (no grooves). Indeed, no flow and pressure were generated with the smooth drum confirming that flow is generated by the grooves in the drum.

More flow tests were performed with different number of grooves to further understand the pumping mechanics. Figure 3.10 presents the pump diagrams of three drums with a 12.7 mm pitch. The drums have one, two (from Figure 3.9) and four grooves respectively. We observe that for higher currents (3 and 4 A) pressure and flow rates scale almost linearly with the number of grooves.

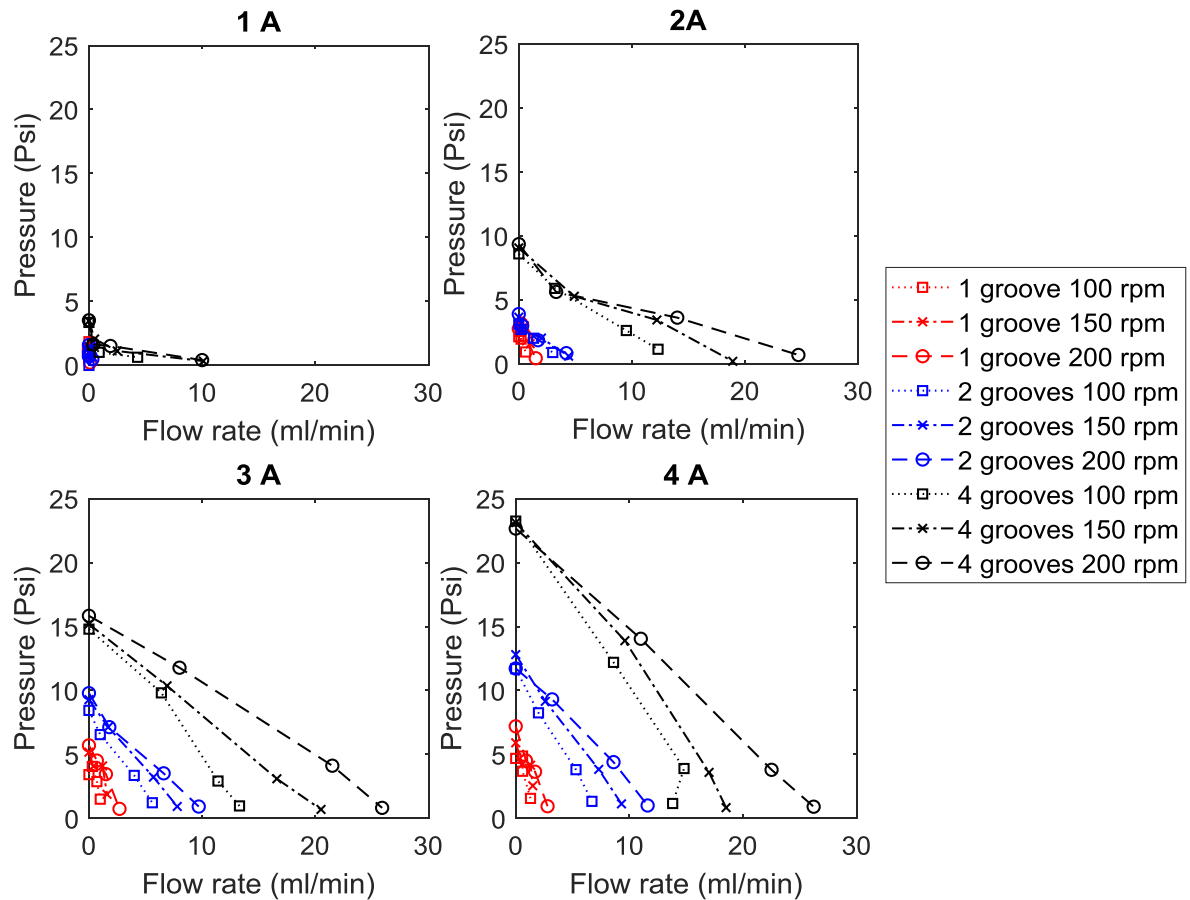


Figure 3.10 : Pump diagrams of 3 drums with a pitch of 12.7 mm for different coil currents.

Figure 3.11 compares experimental data of the 2 grooves and 12.7 mm pitch drum at 4A to its corresponding typical screw pump model as presented on Figure 3.6. The 4 A test was chosen because the MR fluid shear stress is higher at this current, making the magnetic flights

stronger. The 4 A test and is then thought to be closer to the analytical model considering solid flights.

On Figure 3.11, we observe that the test results do not fit with the model presented previously on Figure 3.6. The main differences come from the pressure values when the flow rate is 0 ml/min. For the typical screw pump model, we observe that the analytical pressure at 0 ml/min increases with rotation speed. On the opposite, the experimental pressure at 0 ml/min of the magnetic screw pump is constant at 12 psi for any rpm. The maximum achievable pressure (P_{\max}) is only dependent on coil current. These differences demonstrate that a typical screw model cannot approximate the flow of the magnetic screw.

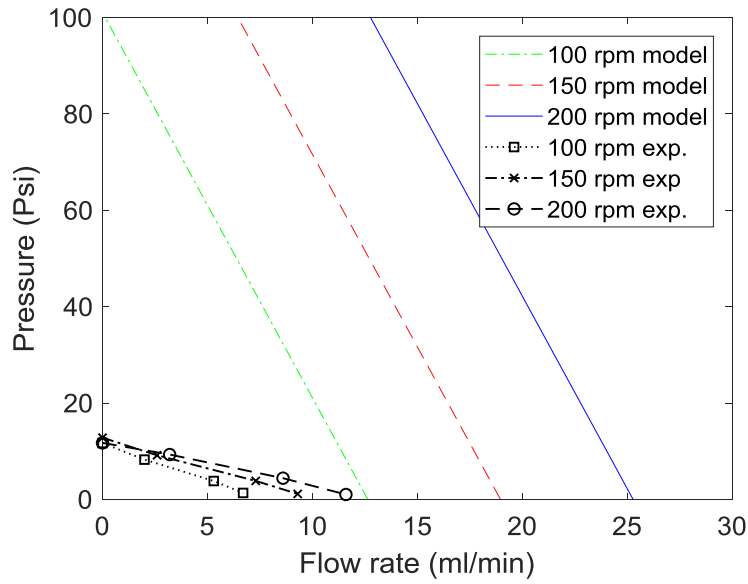


Figure 3.11 : Typical screw pump model and experimental results differences for a drum with two grooves and a pitch of 12.7.

To provide a more accurate model, the yield screw semi-empirical model is proposed. It is described by equation 3.4.

$$Q_{\text{Yield}} = Q_{\text{Couette}} \eta \left(1 - \frac{P}{P_{\max}} \right) \quad (3.4)$$

It is based on the Couette flow from equation 1 to which an efficiency term is added ($\eta \approx 55\%$). The last term is based on the maximum experimental pressure for a given current (P_{\max}). For this drum with two grooves and a pitch of 12.7 at 4 A. In this case, P_{\max} is 12 psi.

The semi-empirical model results are presented on Figure 3.12 along with the experimental data.

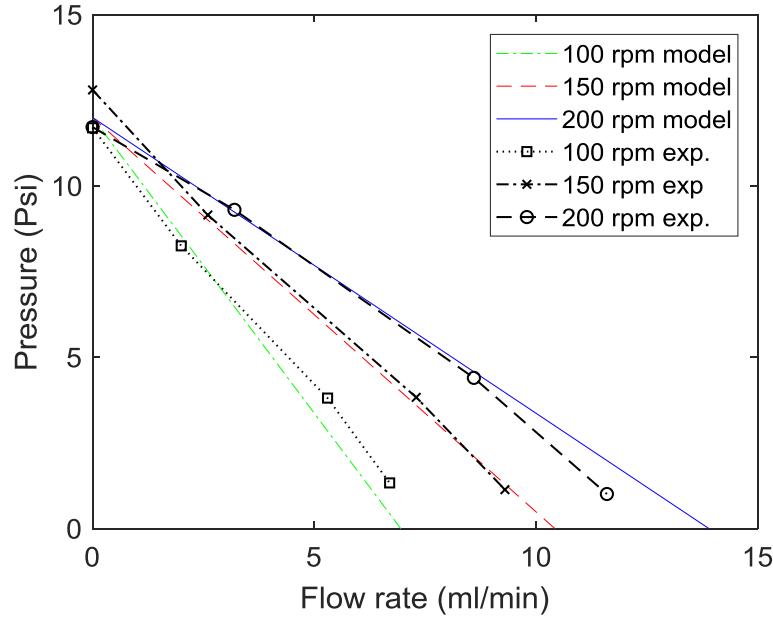


Figure 3.12 : Yield screw pump model and experimental results comparison for a drum with two grooves and a pitch of 12.7.

The semi-empirical model now approximates the experimental data appropriately. To build a complete model, a better understanding of the maximum pressure limit (P_{\max}) of the magnetic screw is necessary. The authors believe that this pressure limitation is caused by the nature of the screw. The flights of the magnetic screw pump are made of MR fluid so they have a finite yield stress. The experimental pressure at 0 ml/min is limited by the maximum shear stress of the magnetized MR fluid flights. The pressure generated on the outlet side of the drum is only retained by the magnetized MR fluid of the shear gaps. The pressure reaches its maximum value when it equals the shear force of the magnetized MR fluid in the shear interface. Beyond this point, the MR fluid flights are constantly being formed and destroyed by the pressure force and this creates a leakage flow from one side of the drum to the other.

To accurately model the pressure-flow behavior of the MR fluid screw pumps would require more tests or multiphysics simulations coupling magnetism and CFD. This modeling work is beyond the scope of this paper and remains future work.

3.5.2 Effect of grooves on torque output

The addition of grooves to the drum of the MR clutch showed a torque increase when compared to the torque produced by a smooth drum. The torque response to current steps of the three grooved drum and a smooth drum are shown on Figure 3.13 for plugged restrictor (0 ml/min flow rate). The torques produced by the grooved drums are higher than the torques of the smooth drum and this tendency is more noticeable as current increases. From Figure 3.13, all drums generate a similar torque value in the first second, but the grooved drum torques keep increasing afterwards as pressure increases. Even if torque increases of ~50% are measured, the torque gain would be of little use in dynamic applications due to its time dependence. The exact nature of the torque increase remains to be investigated. Phenomena of flow work and local particle concentration in the shear zone should be considered. The torque increase was also noticed in the durability tests open-loop torques. From Figure 3.14, we observe that the grooved drum produces more torque than the smooth drum.

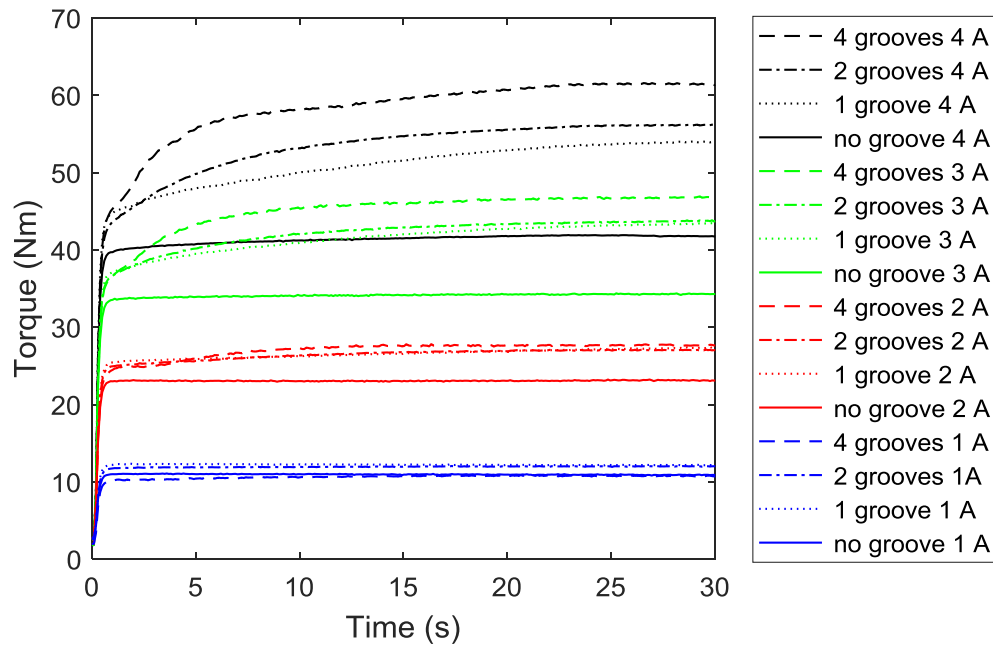


Figure 3.13 : Torque response to current steps for different groove geometries without restrictor on the left (0.375'') and with a plugged restrictor on the right.

3.5.3 Durability test results

Two durability tests were performed: one with a clutch equipped with a grooved drum and the other with a smooth drum. Both tests were performed at 20 Nm and 150 rpm and the average test temperature was maintained at 30°C.

Figure 3.14 shows the open loop characterization torques of the two durability tests with and without grooves. These curves are the averaged torque of every current step of the characterization phase plotted one after the other over LDE. Applying the 20% 3 A torque drop-off criterion based on the initial torque value of each curve, we obtain the LDE of each test (see section III). As identified on the figure, the criterion is met at 27.5 MJ/ml for the test equipped with the magnetic screw pump while the test equipped with a smooth drum reached the limit at 19 MJ/ml. This shows that for the Lord 140CG MRF in the presented clutch and operating conditions, grooves have the potential to increase durability by 45%. It is also interesting to note that grooves seem to provide a more graceful and linear degradation as the test without grooves becomes very erratic when it reaches 19 MJ/ml.

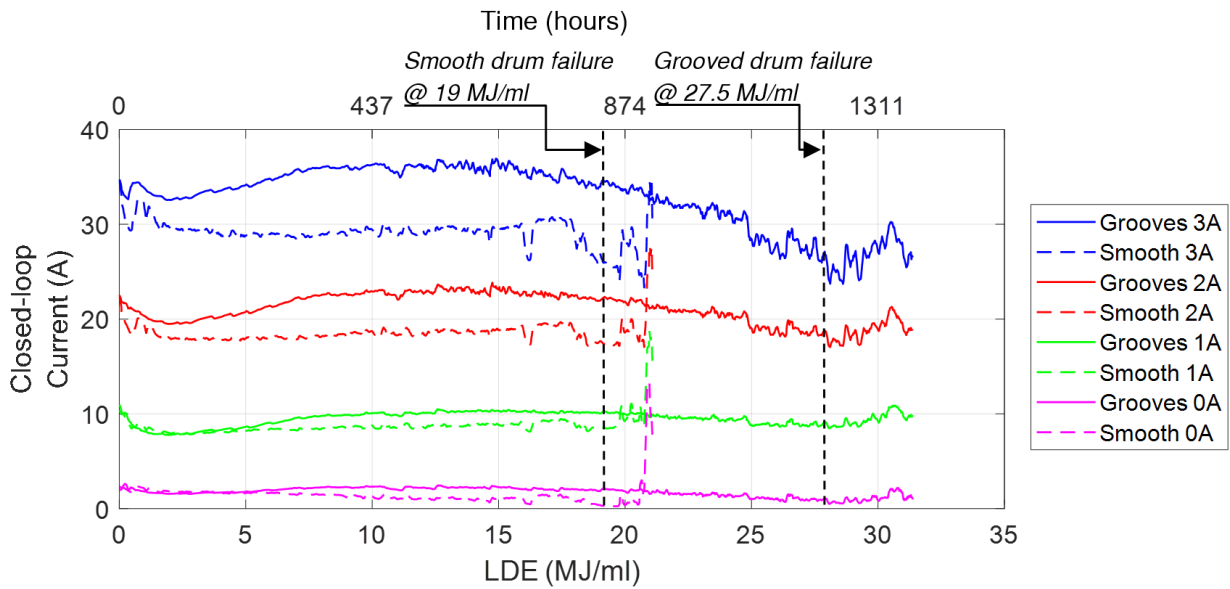


Figure 3.14 : Comparing characterization open loop torques and LDE for clutches equipped with a grooved drum or smooth drum.

Figure 3.15 shows that the aging torque was maintained at 20 Nm and current was adjusted by the closed loop controller for both tests. We can see that current increases in the second portion of the grooved test while it remains constant in the test without grooves. A current increase in the grooved drum test could be explicable by a reduced magnetization of the particles, thus requiring more current to maintain the 20 Nm torque set point. The current of the smooth drum test remained constant throughout the test, but it is interesting to note that the test stopped at the same LDE (≈ 20 MJ/ml) at which the grooved drum test current started increasing.

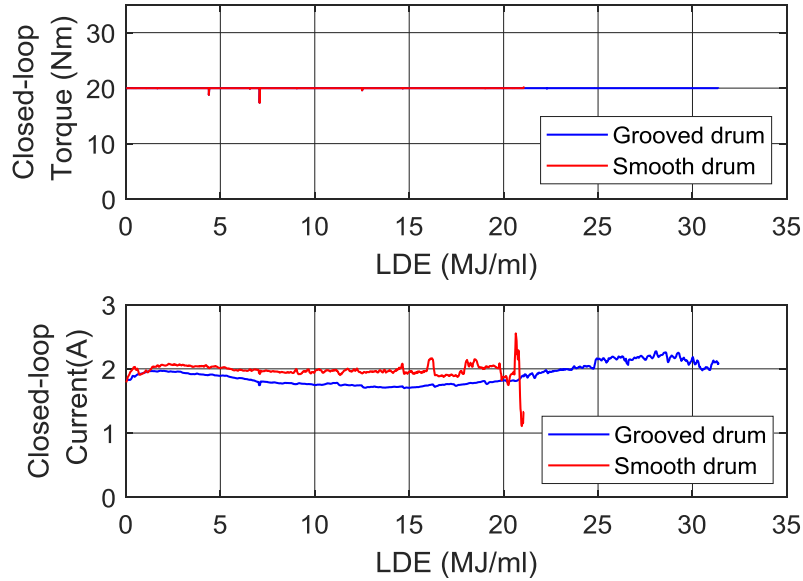


Figure 3.15 : Aging torque and current of the grooved drum and smooth drum durability tests.

Figure 3.16 shows the apparent viscosity measurements of both tests. Both apparent viscosities decrease slightly as the fluid ages. They also become more erratic with large spikes towards the end of life. It is also interesting to note that both tests end when the apparent viscosity approaches 0. This corresponds with the thick cake appearance of the MR fluid which was observed when the clutches were opened after the tests.

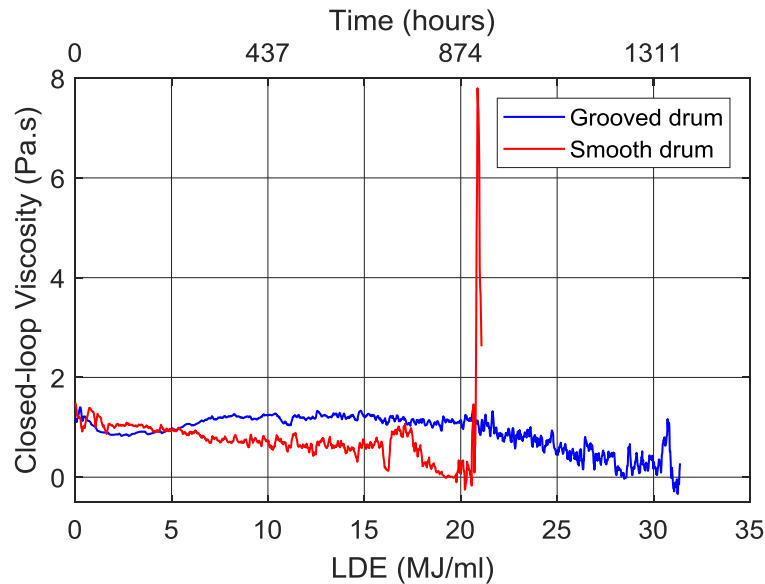


Figure 3.16 : Apparent viscosity values of the grooved drum (blue) and smooth drum (red) durability tests.

Multiple pressure increases were observed during durability tests as shown in Figure 3.17. Pressure increase is specifically important in the beginning of the tests. From a durability standpoint pressure is undesirable as it can cause leakages of MR fluid through seals which would adversely reduce durability. Hence, multiple pressure purges were performed to prevent any systematic variations due to pressure build-ups. Purges are noticeable on Figure 3.17 by the sharp decreases in pressure. The purges were performed manually by opening the MR fluid filling screw located at the top of the MR clutch. Although pressure generation was not studied in great details, the most probable cause for these pressure buildup is outgassing of the Lord 140 CG base oil and/or additives. Pressure buildup is especially noticeable in the presented test conditions due to the constant loading of the MR fluid during the aging phase. Under a dynamic loading, MR fluid could be less prone to this buildup.

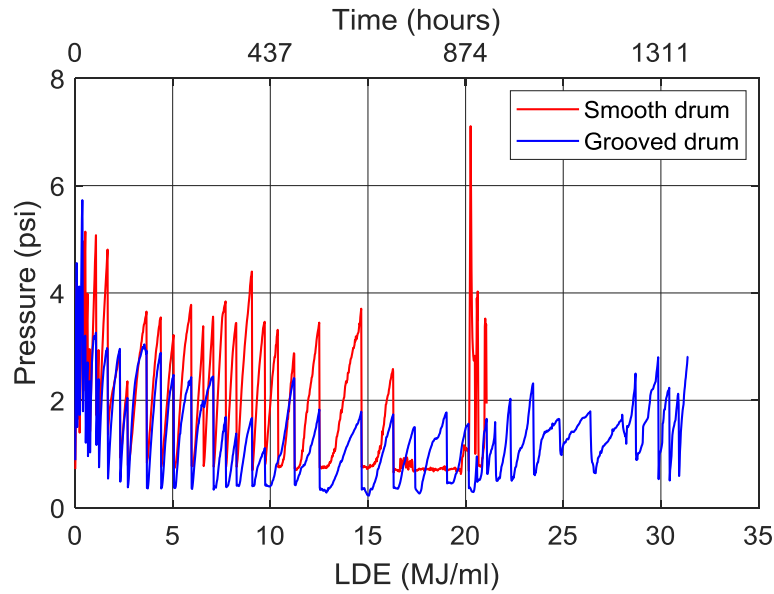


Figure 3.17 : Pressure increase during grooved and smooth drum durability tests.

3.6 Discussions and Conclusions

3.6.1 Summary

This work presents a new method of circulating MR fluid in a clutch that does not require extra parts. It is based on helical grooves machined into the drum of the clutch producing a change in the magnetic field distribution resulting in the formation of two distinct MR fluid structures. The first structure is magnetized and forms a solid MR fluid screw flight following a helical pattern which transports un-magnetized MR fluid located into the grooves. It is shown that this arrangement produces a flow of MR fluid and displays a different behavior when compared to a typical screw pump. This difference is believed to be caused by the limited yield stress of

the MR fluid flights. Flow rates up to 25 ml/min are measured depending on the drum configuration. It is observed that static pressure (at 0 ml/min) and flow rates increase with coil current and the number of grooves. Flow rate also increases with rotational speed like a typical screw pump.

Two durability tests are conducted using the Lord 140CG MR fluid, one with a grooved drum and the other with a smooth drum. Experimental results show that the clutch with the grooved drum lasted 27.5 MJ/ml while the clutch with the smooth drum lasted 19 MJ/ml. This represents a 45% durability increase. The addition of grooves to the clutch showed great results in this specific application, but it is important to recall that the effects on durability could vary for another MR fluid or another application depending on the dominant failure mode of the MR fluid. Nonetheless, the results show that the magnetic screw pump has the potential to greatly improve the durability of MR clutches in high power applications.

3.6.2 Extra benefits/potential applications of grooves

This research could allow for more MR clutches to be used in high power applications such as aircraft primary flight controls. In addition, MR fluid pumping presents additional benefits such as:

1. Increasing mean time between maintenance by adding extra MR fluid to the clutch and recirculating it. The extra MR fluid volume could be contained in an external reservoir, thus simplifying clutch design.
2. Simplifying MR fluid change by pumping the used MR fluid out of the clutch and to pump new fluid into it. If an external reservoir is used as mentioned previously, the fluid contained in it could be replaced easily or the reservoir could be swapped for a new one.
3. Treating the MR fluid in an external reservoir. For example, additives and/or base oil could be added to the reservoir to maintain an optimal fluid composition.
4. Reducing shear zone temperatures by promoting heat and mass transfer with MR fluid flow for very high power applications (~10 kW).
5. Sharing MR fluid between an array of clutches. If multiple clutches are used under different load cases, the MR fluid could be circulated between them in order to share the load of the more heavily loaded clutches. This would average the total dissipated energy over the complete MR fluid volume.

3.6.3 Future work

These benefits could be enhanced if flow rates are increased. To do so, the MR fluid flow and pumping action needs to be better understood. Multiphysics CFD modeling and flow visualization would be particularly useful to this purpose, but remains future work.

This research is supported by the CRIAQ of Québec, the NSERC of Canada, Bell Flight and Gastops.

CHAPITRE 4

CONCLUSION

La durabilité des embrayages MR doit être améliorée afin de les utiliser pour contrôler les surfaces de vol d'un hélicoptère. Ce travail présente une méthode de circulation de fluide MR qui permet d'augmenter la durabilité. Elle est basée sur des rainures hélicoïdales usinées dans le tambour de l'embrayage produisant une concentration de champ magnétique résultant de la formation de deux structures de fluide MR distinctes. La première structure est magnétisée et forme une vis de fluide MR solide qui transporte la seconde structure de fluide MR qui est non magnétisée. Les tests expérimentaux ont démontré que cette disposition produit un débit de fluide MR. Toutefois, elle présente un comportement différent de celui d'une pompe à vis typique. Cette différence est possiblement causée par la faible limite d'écoulement du fluide MR qui forme la vis. Des débits allant jusqu'à 25 ml/min ont été mesurés et dépendent de la configuration du tambour. Il est démontré que la pression statique (à 0 ml/min) et les débits augmentent avec le courant de la bobine et le nombre de rainures. Le débit augmente également avec la vitesse de rotation comme une pompe à vis typique.

Deux tests de durabilité ont été effectués en utilisant le fluide MR Lord 140CG, l'un est équipé avec un tambour rainuré et l'autre avec un tambour lisse. Les résultats expérimentaux montrent que l'embrayage avec le tambour rainuré a pu dissiper 27,5 MJ/ml tandis que l'embrayage avec le tambour lisse a dissipé 19 MJ/ml avant que le couple ait diminué de 20% par rapport à sa valeur initiale. Cela représente une augmentation de la durabilité de 45%. L'ajout de rainures à l'embrayage a donné d'excellents résultats dans cette application précise, mais il est important de rappeler que les effets sur la durabilité pourraient varier pour un autre fluide MR ou une autre application selon le mode de défaillance dominant du fluide MR. Sommes toute, les résultats démontrent un grand potentiel pour améliorer la durabilité des embrayages MR utilisés dans des applications à haute puissance.

Cette recherche pourrait permettre d'utiliser davantage d'embrayages MR dans des applications à haute puissance, pour le contrôle des surfaces de vol d'aéronef. De plus, le concept de pompe magnétique présente des avantages supplémentaires tels que:

1. Augmenter les intervalles de maintenance en ajoutant du fluide MR supplémentaire à l'embrayage et en le recirculant. Le volume de fluide MR supplémentaire pourrait être contenu dans un réservoir externe, simplifiant ainsi la conception de l'embrayage.
2. Simplifier le changement de fluide MR en pompant le liquide MR usé hors de l'embrayage et en y injectant du fluide neuf. Si un réservoir externe est utilisé comme mentionné précédemment, le réservoir en entier pourrait être remplacé par un nouveau.
3. Contrôler la composition du fluide MR. Par exemple, des additifs et/ou une huile de base pourraient être ajoutés au réservoir pour maintenir une composition de fluide optimale.
4. Réduire les températures de la zone de cisaillement en favorisant le transfert de chaleur et de masse avec le flux de MR pour les applications à très haute puissance (~ 10 kW). Pour ce faire le débit devra être augmenté.
5. Partager le fluide MR entre une série d'embrayages. Si plusieurs embrayages sont utilisés pour différents cas de chargement, le fluide MR pourrait circuler entre eux afin d'uniformiser l'usure du fluide.

Ces applications pourraient être améliorées si les débits étaient augmentés davantage. Pour ce faire, le flux de fluide MR et l'action de pompage doivent être mieux compris. Il serait pertinent de tester d'autres géométries de rainures et de comparer les débits et pressions obtenues. De plus, la modélisation CFD multiphysique et la visualisation de flux magnétique seraient également très utiles pour mieux comprendre le phénomène de pompage.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] B. Legrand, J. Loyer, M. Guillaume, and J. Perrochat, "EMA Technology Development," *MOET Proj. Consort.*, 2009.
- [2] J. A. Rosero, J. A. Ortega, E. Aldabas, and L. Romeral, "Moving towards a more electric aircraft," *Aerosp. Electron. Syst. Mag. IEEE*, vol. 22, no. 3, pp. 3–9, 2007.
- [3] R. I. Jones, "The more electric aircraft - assessing the benefits," *J. Aerosp. Eng.*, vol. 216, no. 5, pp. 259–269, Jan. 2002.
- [4] J. Viau, P. Chouinard, J. P. L. Bigué, G. Julió, F. Michaud, and J. S. Plante, "Tendon-Driven Manipulator Actuated by Magnetorheological Clutches Exhibiting Both High-Power and Soft Motion Capabilities," *IEEEASME Trans. Mechatron.*, vol. 22, no. 1, pp. 561–571, 2017.
- [5] P. Chouinard, M. Denninger, and J.-S. Plante, "Reliable and lightweight primary flight control actuation using magneto-rheological clutches in slippage," in *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2015, pp. 213–219.
- [6] J. D. Carlson, "What Makes a Good MR Fluid?," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 13, no. 7–8, pp. 431–435, Jan. 2002.
- [7] "Magnetorheological fluid," *Wikipedia*. 03-Feb-2018.
- [8] Hreinsson, Einar, "High durability magnetorheological fluids," University of Iceland, 2011.
- [9] John C. Ulicny *, Michael P. Balogh, Noel M. Potter, Richard A. Waldo, "Magnetorheological fluid durability test—Iron analysis."
- [10] Godmunsson, "Design of a Magnetorheological Fluid for an MR Prosthetic Knee Actuator with an Optimal Geometry," 2011.
- [11] G. R. Iglesias, L. F. Ruiz-Morón, J. D. G. Durán, and A. V. Delgado, "Dynamic and wear study of an extremely bidisperse magnetorheological fluid," *Smart Mater. Struct.*, vol. 24, no. 12, p. 127001, Nov. 2015.
- [12] Teresa L. Forehand, Daneil E. Barber, "High durability magnetorheological fluids," WO 2010141336 A1, 09-Dec-2010.
- [13] D. M. Wang, Y. F. Hou, and Z. Z. Tian, "A novel high-torque magnetorheological brake with a water cooling method for heat dissipation," *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, no. 2, p. 025019, 2013.
- [14] J.-F. Desrosiers, J.-P. L. Bigué, M. Denninger, G. Julió, J.-S. Plante, and F. Charron, "Preliminary investigation of magneto-rheological fluid durability in continuous slippage clutch," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 412, no. 1, p. 012022, 2013.
- [15] D. Güth and J. Maas, "Characterization and modeling of the behavior of magnetorheological fluids at high shear rates in rotational systems," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 27, no. 5, pp. 689–704, Mar. 2016.
- [16] D. Güth and J. Maas, "Long-term stable magnetorheological fluid brake for application in wind turbines," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, p. 1045389X15624794, Jan. 2016.
- [17] D. Guth, M. Schamoni, and M. Jürgen, "ENERGY-EFFICIENT MRF-CLUTCH WITH OPTIMIZED TORQUE DENSITY," presented at the Proceedings of the ASME 2013 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, Snowbird, Utah, USA, 2013.

- [18] J. Rabinow, "Magnetic fluid torque and force transmitting device," US2575360A, 31-Oct-1947.
- [19] W. M Winslow, "Field responsive fluid couplings," US2886151A, 07-Jan-1949.
- [20] P. Benedict Usoro, A. L. Smith, C.-K. Kao, G. Moser, and G. Sommer, "Magnetorheological fluid clutch," US6318531B1, 20-Jun-2000.
- [21] J.-S. Plante *et al.*, "Magnetorheological fluid clutch apparatus and control systems," WO2015113165 A1, 06-Aug-2015.
- [22] A. L. Smith, J. C. Ulicny, and L. C. Kennedy, "Magnetorheological Fluid Fan Drive for Trucks," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 18, no. 12, pp. 1131–1136, 2007.
- [23] C. Kieburg, G. Oetter, M. Laun, C. Gabriel, and H. Steinwender, "MR All-Wheel-Drive Prototype Car Driving Tests and Durability Requirements for the MR Fluids used.," in *Proceedings of the 11th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions*, 2008.
- [24] J. C. Ulicny, M. P. Balogh, N. M. Potter, and R. A. Waldo, "Magnetorheological fluid durability test-Iron analysis," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 443, no. 1–2, pp. 16–24, 2007.
- [25] A. W. Birley, B. Haworth, and J. Batchelor, *Physics of Plastics: Processing, Properties, and Materials Engineering*. Hanser Publishers, 1992.

